



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

Διπλωματική εργασία
του Σπηλιωτάκου Γεώργιου

« Ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων διάταξης
απορρόφησης ενέργειας με απαραμόρφωτα παρεμβλήματα σε συνθήκες
πλευρικής φόρτισης »

« Finite Element Analysis of an energy absorption setup with rigid
inserts under lateral loading »

Επιβλέπων καθηγητής: Δημήτριος Ε. Μανωλάκος

Συνεπιβλέπων: Πρωτεσίλαος Κωστάζος, Ε.ΔΙ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2019

Ευχαριστίες:

Θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον κ. Δ. Μανωλάκο για την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας και τη δυνατότητα που μου έδωσε να ολοκληρώσω με ένα τέτοιο θέμα τη φοίτηση μου στη σχολή. Επίσης σημαντική ήταν και η συμβολή του Δρ. Μηχ. Πρωτεσίλαου Κωστάζου (μέλος Ε.ΔΙ.Π) στη προσπάθεια μου να μάθω τις δυνατότητες της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων αλλά και στη συγγραφή του τελικού κειμένου της εργασίας αυτής.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, που με στήριζαν όλα αυτά τα χρόνια κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη:

Οι μεταλλικές δομές λεπτού πάχους χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη βιομηχανία οχημάτων, οπότε κρίνεται σκόπιμο να διερευνηθεί η ικανότητα τους να απορροφούν ενέργεια, και κατ' επέκταση να προστατεύουν τους επιβάτες/εμπορεύματα σε πιθανή σύγκρουση.

Οι δομές που μελετώνται, απαρτίζονται από διάφορες διατάξεις κυλινδρικών δοκιμίων διαφορετικών παχών. Δοκιμάζονται συνολικά δύο διαφορετικά πάχη και τέσσερις διαφορετικές διατάξεις. Τα δοκίμια είναι φτιαγμένα από αλουμίνιο και υποβάλλονται σε πλευρική φόρτιση.

Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς κατάρρευσης των κελυφών χρησιμοποιήθηκε ο Κώδικας Πεπερασμένων Στοιχείων, LS-DYNA. Έχει προηγηθεί πειραματική δοκιμή των διαφόρων διατάξεων και διενεργήθηκε αριθμητική ανάλυση, καθώς και αριθμητική παραμετρική ανάλυση. Για αυτό δημιουργήθηκαν και πρόσθετα αριθμητικά μοντέλα σε δύο διαφορετικές διατάξεις.

Έγινε λεπτομερής σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και των αριθμητικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν, καθώς και περαιτέρω σχολιασμός επ' αυτών και εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα.

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, είναι η εύρεση κατάλληλης διάταξης για συστήματα απορρόφησης ενέργειας που χρησιμοποιούνται ως προστασία σε σταθερές δομές.

Abstract:

Metallic thin-walled structures are extensively used in vehicle industry, thus their ability to absorb energy and therefore to protect passengers/cargo in a possible collision should be investigated.

The structures being studied are composed of various assemblies of different thickness of cylindrical specimens. A total of two different thicknesses and four different arrangements are tested. The specimens are made of aluminum and subjected to lateral loading.

The Finite Element Code Ls-Dyna was used to simulate the crushing behavior of the shells. Experimental testing of various assemblies has been carried out and numerical analysis as well as numerical parametric analysis were performed. For this, additional numerical models were created in two different configurations.

A detailed comparison of the obtained experimental and numerical results along with a further discussion on them were conducted and useful concluding remarks were drawn.

The purpose of this thesis is to find a suitable layout for energy absorption systems that are used as protection in fixed structures.

Περιεχόμενα:

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1. Αλουμίνιο.....	6
1.1.1. Γενικά για το αλουμίνιο.....	6
1.1.2. Ιδιότητες αλουμινίου.....	6
1.1.3. Χρήσεις του αλουμινίου.....	8
1.1.4. Κράματα αλουμινίου.....	9
1.2. Crashworthiness (Αντοχή σε σύγκρουση).....	10
1.3. Ατυχήματα.....	11
1.3.1. Γενικά.....	11
1.3.2. Η κατάσταση στην Ελλάδα.....	11
1.3.3. Συνέπειες στον ανθρώπινο οργανισμό.....	12

Κεφάλαιο 2: Μέθοδος Πεπερασμένων στοιχείων

2.1. Γενικά.....	14
2.2. LS-Dyna.....	15

Κεφάλαιο 3: Συστήματα Απορρόφησης Ενέργειας (Energy Absorbing Systems)

3.1. Ορισμός.....	16
3.2. Γενικές αρχές.....	16
3.3. Μέθοδοι κατάρρευσης κελυφών λεπτού πάχους.....	18
3.3.1. Αναστροφή (inversion).....	18
3.3.2. Αξονικός διαχωρισμός (tearing/splitting).....	19
3.3.3. Πλευρική κατάρρευση (lateral compression/flattening).....	20
3.3.4. Πλευρική άσκηση σημειακού φορτίου (lateral indentation).....	20
3.3.5. Αξονική κατάρρευση.....	20
3.3.6. Σύγκριση αξονικά και πλευρικά καταπονούμενων σωλήνων.....	20

Κεφάλαιο 4: Στοιχεία Θεωρίας

4.1. Ορισμοί- Συμπληρωματικές έννοιες.....	22
4.1.1. Πλαστικός αρμός (plastic hinge).....	22
4.1.2. Ροπή πλήρους πλαστικοποίησης (M_p).....	23
4.2. Θεωρητική προσέγγιση του μηχανισμού κατάρρευσης.....	24

4.3. Πλευρική κατάρρευση σωλήνων ορθογωνικής και τετραγωνικής διατομής.....	24
4.4. Πλευρική κατάρρευση σωλήνων κυκλικής διατομής.....	26
4.4.1. Ανάλυση της ισοδύναμης παραμόρφωσης στα χαρακτηριστικά σημεία.....	29
4.4.2. Ανάπτυξη πλαστικών αρμών.....	29
4.5. Διάγραμμα Φορτίου- Μετατόπισης.....	30
4.6. Δείκτες ενεργειακής απορρόφησης.....	30
Κεφάλαιο 5: Πειραματική Διαδικασία	
5.1. Γενικά.....	32
5.2. Περιγραφή της πειραματικής διάταξης.....	32
5.3. Δοκίμια.....	33
5.4. Απαραμόρφωτα παρεμβλήματα.....	33
5.5. Διατάξεις πειραματικών διαδικασιών και τρόπος διεξαγωγής πειραμάτων.....	34
Κεφάλαιο 6: Αριθμητική Προσομοίωση	
6.1. Γενικά.....	36
6.2. Περιγραφή μοντέλων και ιδιοτήτων τους.....	36
6.3. Παρουσίαση αριθμητικών προσομοιώσεων και σύγκριση με πειραματικές διατάξεις.....	39
6.4. Παρατηρήσεις και σύγκριση των πειραματικών διατάξεων με τις διατάξεις μοντελοποίησης... 123	
6.4.1. Ορθογωνικές διατάξεις.....	123
6.4.2. Τριγωνικές διατάξεις	125
6.4.3. Μικτές διατάξεις.....	127
6.4.4. Παραμετρικές διατάξεις.....	129
6.5. Συμπεράσματα, περαιτέρω έρευνα και προτάσεις.....	131
6.5.1. Λόγοι απόκλισης δεδομένων μοντελοποίησης από αυτών του πειράματος	131
6.5.2. Τελικά συμπεράσματα και σύγκριση πειράματος- μοντελοποίησης.....	132
6.5.3. Περαιτέρω έρευνα και προτάσεις.....	132
Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων.....	135
Βιβλιογραφία.....	136

1. Εισαγωγή

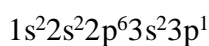
1.1. Αλουμίνιο

1.1.1. Γενικά για το αλουμίνιο

Το αλουμίνιο είναι ένα μέταλλο με ευρεία εφαρμογή σε πολλούς τομείς (κατασκευή κτηρίων, αυτοκινητοβιομηχανία, ναυπηγική, αεροπορική και αεροδιαστημική βιομηχανία, κατασκευή στρατιωτικού εξοπλισμού, παρασκευή συσκευασιών τροφίμων) και αυτό οφείλεται στο χαμηλό του κόστος παραγωγής καθώς και στις πολύ καλές φυσικές του ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα το αλουμίνιο είναι ένα ελαφρύ μέταλλο με καλή αντοχή στη διάβρωση, σε ατμοσφαιρικές συνθήκες όσο και στο νερό (συμπεριλαμβανομένου του θαλασσινού νερού), όπως και σε διαφόρων τύπων χημικών ουσιών και λαδιών.

Είναι το πιο άφθονο μέταλλο στο φλοιό της γης, αποτελώντας το 8% του βάρους του. Είναι δύσκολο να βρεθεί ελεύθερο στη φύση εξαιτίας της έντονης δραστηριότητας του και γι' αυτό το λόγο βρίσκεται ενωμένο σε πάνω από 270 ορυκτά, με την κύρια πηγή για τη βιομηχανική παραγωγή του να προέρχεται από την επεξεργασία του βωξίτη.

Το αλουμίνιο είναι χημικό στοιχείο με σύμβολο Al και ατομικό αριθμό 13. Η ηλεκτρονιακή διαμόρφωση του είναι:



,οπότε συμπεραίνουμε ότι ανήκει στην 13η (δέκατη τρίτη) ομάδα του Περιοδικού Πίνακα, στην 3η (τρίτη) περίοδο και στον τομέα p. Έχει ατομικό βάρος λίγο μεγαλύτερο από 26,98 και πυκνότητα 2,7g/cm³, ενώ το σημείο τήξης του είναι περίπου 660,32 °C και το σημείο βρασμού περίπου 2519 °C.

1.1.2. Ιδιότητες αλουμινίου

Το αλουμίνιο είναι σχετικά μαλακό, ανθεκτικό και εύπλαστο, ενώ το χρώμα του είναι συνήθως ασημένιο που ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας του φτάνει το σκούρο γκρι. Ένα καινούργιο φύλλο αλουμινίου που δεν έχει προλάβει να οξειδωθεί η επιφάνεια του, ανακλά πολύ καλά τα χρώματα του φωτεινού φάσματος (σε ποσοστό περίπου 92%) και εξαιρετικά την υπέρυθη ακτινοβολία (98%).

Η υψηλή αντοχή του σε μηχανικές καταπονήσεις για τόσο χαμηλό βάρος ανά μονάδα όγκου και η εξαιρετική του αντοχή σε διάβρωση, έχει καταστήσει το αλουμίνιο πολύ σημαντικό στη βιομηχανία και στις κατασκευές. Βέβαια η αντοχή του είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με το χάλυβα (περίπου το 1/3) και στην καθαρή του μορφή είναι αρκετά μαλακό και όλκιμο. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, προστίθενται διάφορα στοιχεία όπως χαλκός, μαγνήσιο, μαγγάνιο, πυρίτιο, κασσίτερος, ψευδάργυρος κ.ά. (σε διάφορα ποσοστά) δημιουργώντας μεγάλη ποικιλία στις «σειρές» αλουμινίου και επιτυγχάνοντας θεαματική βελτίωση στις μηχανικές του ιδιότητες.

Είναι καλός αγωγός της θερμότητας και του ηλεκτρισμού, έχοντας το 59% της αγωγιμότητας του χαλκού (θερμική και ηλεκτρική) αλλά μόνο το 30% της πυκνότητάς του. Σε καθαρή κατάσταση, το αλουμίνιο, φέρεται σε εύκαμπτες πλάκες ή σε σκόνη, που όταν καίγεται σε ατμόσφαιρα οξυγόνου παράγουν έντονο φως (λυχνία αλουμινίου). Είναι πολύ ανθεκτικό στη διάβρωση, πράγμα που οφείλεται στον άμεσο σχηματισμό ενός λεπτού, επιφανειακού στρώματος οξειδίου του που εμποδίζει τη βαθύτερη διάβρωσή του (φαινόμενο της παθητικοποίησης). Πάντως, τα πιο ισχυρά κράματα αλουμινίου είναι λιγότερο ανθεκτικά στη διάβρωση εξαιτίας της παρουσίας χαλκού. Δεν προσβάλλεται από το νιτρικό οξύ σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, αλλά αντιδρά έντονα με το υδροχλωρικό και το υδροφθορικό οξύ με καταστροφικές συνέπειες για αυτό.

Διαθέτει 6 ραδιενεργά ισότοπα, από τα οποία μόνο το ^{27}Al είναι ευσταθές και βρίσκεται σε κάποιους μετεωρίτες, στους οποίους παράγεται από την κοσμική ακτινοβολία, ενώ χάρη στο μεγάλο χρόνο υποδιπλασιασμού του, χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ραδιενέργειας ως πρότυπο και σε έρευνες της διάβρωσης κραμάτων.

	Αλουμίνιο	Χάλυβας	Μαγνήσιο	Τιτάνιο
Πυκνότητα (g/cm ³ σε θερμοκρασία 20 °C)	2,7	7,83	1,74	4,5
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	70	210	45	110
Αντοχή σε εφελκυσμό (N/mm ²)	150-680	300-1200	100-380	910-1190

Πίνακας 1.1: Σύγκριση αλουμινίου με άλλα μέταλλα.

1.1.3. Χρήσεις του αλουμινίου

Λόγω του συνδυασμού των ιδιοτήτων του και της εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνεται, οι χρήσεις του αλουμινίου αυξάνονται συνεχώς και αποτελούν μέρος της καθημερινής μας ζωής προσφέροντας λύσεις στις ανάγκες της κοινωνίας. Η χρήση του εξαπλώνεται στους παρακάτω τομείς:

-Στον τομέα των μεταφορών και συγκεκριμένα στην κατασκευή αυτοκινήτων, φορτηγών, αεροπλάνων, τραίνων, πλοίων, διαστημικών οχημάτων, ακόμα και ποδηλάτων. Το χαμηλό του βάρος, η στιβαρότητά του και η αντοχή του σε διάβρωση το καθιστούν ένα από τα πιο σημαντικά υλικά στις βιομηχανίες. Ειδικότερα στην αυτοκινητοβιομηχανία, που δίνεται μεγάλη βαρύτητα στην προσεκτική επιλογή ελαφρών υλικών, το αλουμίνιο έχει αντικαταστήσει το χάλυβα σε συγκεκριμένα σημεία του πλαισίου (chassis) του οχήματος και ταυτόχρονα «ντύνει» το εξωτερικό του. Η μείωση του βάρους που επιτυγχάνεται με αυτό τον τρόπο, οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου και συνεπώς σε λιγότερους εκπεμπόμενους ρύπους για το περιβάλλον.

-Στις οικοδομικές κατασκευές το αλουμίνιο ανταποκρίνεται επιτυχώς σε κάθε αρχιτεκτονική ιδέα και απαίτηση από πλευράς μηχανικών αντοχών, ηχομόνωσης και θερμομόνωσης, προσφέροντας μεγάλη λειτουργικότητα. Ειδικότερα, σε μια οικοδομή το αλουμίνιο βρίσκει εφαρμογή σε πόρτες, παράθυρα, συστήματα υαλοπετασμάτων, συστήματα σκίασης, ρολά, περσίδες και κάγκελα. Παρουσιάζει καλή θερμική συμπεριφορά στις εκάστοτε κλιματολογικές συνθήκες καθώς έρευνες έδειξαν ότι μέσω της χρήσης αλουμινίου στη δόμηση εξοικονομείται ενέργεια (περισσότερο το καλοκαίρι παρά το χειμώνα).

-Στις συσκευασίες τροφίμων και άλλων προϊόντων καθημερινής χρήσης. Το αλουμίνιο είναι αδιαπέραστο από μικροοργανισμούς και φως διατηρώντας έτσι τη φρεσκάδα των προϊόντων που συσκευάζονται. Επίσης η ευκολία κατεργασίας του μας δίνει τη δυνατότητα να το χρησιμοποιήσουμε σε διάφορα πάχη με ασφάλεια για την προστασία των προϊόντων, ενώ το χαμηλό του βάρος εξοικονομεί καύσιμα από τις μεταφορές και βοηθά και στην προστασία του περιβάλλοντος. Επιπρόσθετα, είναι πλήρως ανακυκλώσιμο χωρίς υποβάθμιση των ιδιοτήτων του και η διαδικασία της ανακύκλωσής του εξοικονομεί 95% ενέργεια σε σχέση με τη διαδικασία παραγωγής πρωτόχυτου μετάλλου.

-Τέλος χρησιμοποιείται στη βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικών καλωδίων και λόγω της εξαιρετικής ευχυτότητας μπορούμε να του δώσουμε ιδιαίτερα και πολύπλοκα σχήματα κάνοντας τη χρήση του ακόμα πιο διαδεδομένη και σε άλλους τομείς.

1.1.4. Κράματα αλουμινίου

Το αλουμίνιο στην καθαρή του μορφή είναι ένα σχετικά μαλακό και εύπλαστο μέταλλο και έτσι δεν συνιστάται σε κατασκευές που απαιτούν υψηλές μηχανικές ιδιότητες. Αυτό αντιμετωπίζεται με την προσθήκη κραματικών στοιχείων (όπως χαλκού, σιδήρου, μαγνησίου, μαγγανίου, πυριτίου, κασσίτερου, ψευδάργυρου κ.ά.) το κάθε ένα από τα οποία προσδίδει διαφορετικές ιδιότητες στο παραγόμενο κράμα, δημιουργώντας έτσι μια μεγάλη γκάμα για να επιλέξουμε ανάλογα με τις ανάγκες μας. Όπως το καθαρό αλουμίνιο, έτσι και τα κράματά του έχουν χαμηλή πυκνότητα, καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, υψηλή αντοχή σε διάβρωση και μεγάλη ευχυτότητα. Βέβαια, τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά διαφέρουν ως προς την «ένταση» ανάλογα με την περιεκτικότητα στα προστιθέμενα υλικά.

ΠΡΟΣΘΗΚΗ	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ
Χαλκός	Σε ποσοστό ως 12%, βελτιώνει τη μηχανική αντοχή και τη κατεργασιμότητα.
Σίδηρος	Βελτιώνει την αντοχή και την σκληρότητα και μειώνει τις πιθανότητες θερμής ρωγμάτωσης κατά την χύτευση.
Μαγγάνιο	Βελτιώνει την ολκιμότητα και, σε συνδυασμό με τον σίδηρο, τη χυτευσιμότητα.
Μαγνήσιο	Βελτιώνει την μηχανική αντοχή και την αντοχή σε διάβρωση. Σε ποσοστό μεγαλύτερο από 6% προκαλεί σκλήρυνση με κατακρήμνιση.
Πυρίτιο	Βελτιώνει, σε μεγάλο βαθμό, την χυτευσιμότητα και την αντοχή σε διάβρωση.
Ψευδάργυρος	Μειώνει την χυτευσιμότητα, όμως σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία προσθήκης, βελτιώνει την μηχανική αντοχή.

Πίνακας 1.2: Επίδραση των κραματικών στοιχείων στις ιδιότητες του αλουμινίου ξεχωριστά.

1.2. Crashworthiness (αντοχή σε σύγκρουση)

Ο όρος crashworthiness χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά από την αεροδιαστημική βιομηχανία στις αρχές της δεκαετίας του '50 και είναι η ικανότητα μίας κατασκευής και των εξαρτημάτων της να προστατεύει τους επιβάτες κατά τη διάρκεια σύγκρουσης. Υποδηλώνει ένα μέτρο της ικανότητας του οχήματος να παραμορφώνεται πλαστικά κατά τη σύγκρουση διατηρώντας αρκετό ζωτικό χώρο για τους επιβάτες. [1]

Αυτό εξετάζεται κατά τη διερεύνηση της ασφάλειας των οχημάτων. Ανάλογα από τη φύση της σύγκρουσης και το εμπλεκόμενο σε αυτή όχημα, χρησιμοποιούνται ποικίλα κριτήρια για να καθοριστεί η αντοχή της κατασκευής σε σύγκρουση (crashworthiness).

Η αντοχή σε σύγκρουση μπορεί να αξιολογηθεί δημιουργώντας υπολογιστικά μοντέλα (κάνοντας χρήση λογισμικών πακέτων όπως το LS-DYNA, MSC Dytran, MADYMO) ή πειραματικά, ή εκ των υστέρων, από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της συντριβής. Τα διάφορα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της αντοχής σε σύγκρουση μελλοντικά, συμπεριλαμβάνουν τα μοτίβα παραμόρφωσης της δομής, την επιβράδυνση του οχήματος κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης και την πιθανότητα τραυματισμού.

Η πιθανότητα τραυματισμού προβλέπεται από μοντέλα που προσομοιάζουν το ανθρώπινο σώμα και προσδιορίζεται με βάση ορισμένων κριτηρίων που λαμβάνονται υπόψη μηχανικές παράμετροι (π.χ. δύναμη, επιτάχυνση, παραμόρφωση κ.α.) που συσχετίζονται με τον κίνδυνο τραυματισμού. [2]

Ένα κοινό κριτήριο τραυματισμού είναι το κριτήριο πρόσκρουσης της κεφαλής (Head Impact Criterion). Η εκ των υστέρων αξιολόγηση της αντοχής στις συγκρούσεις προσδιορίζεται από την ανάλυση του κινδύνου τραυματισμού σε πραγματικές περιπτώσεις ατυχημάτων, κάνοντας χρήση στατιστικών τεχνικών με σκοπό τον έλεγχο του μεγάλου πλήθους μεταβλητών που υπάρχουν σε μία σύγκρουση. Στις μέρες μας η αντοχή των οχημάτων σε σύγκρουση αξιολογείται σε τέσσερα ξεχωριστά πεδία. Αυτά είναι η εμπρόσθια αντοχή, η οπίσθια, η πλευρική και τέλος η αντοχή του οχήματος όταν αυτό ανατρέπεται. [1]

1.3. Ατυχήματα

1.3.1. Γενικά

Η τεχνολογική πρόοδος έχει οδηγήσει στην αύξηση του πλήθους των οχημάτων, του βάρους τους, των αποστάσεων που διανύουν αλλά και των ταχυτήτων που επιτυγχάνουν. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως αν αυτά τα οχήματα συγκρουστούν, θα παρουσιαστούν σοβαρές επιπτώσεις σε ανθρώπους και περιβάλλον. [3]

Το παγκόσμιο ενδιαφέρον διαρκώς αυξάνεται όσον αφορά τον ασφαλή σχεδιασμό συστημάτων που έχουν στόχο τη μείωση των ανθρώπινων τραυματισμών/θανάτων, καθώς και των οικονομικών επιπτώσεων που προκύπτουν απ' αυτούς. Η σύγκρουση των οχημάτων είναι ένα ατυχές φαινόμενο αλλά παρουσιάζεται αρκετά συχνά.

Με βάση τα παραπάνω, είναι αυτονόητο ότι τα μελλοντικά οχήματα πρέπει να σχεδιάζονται με σκοπό την προστασία των επιβατών, αλλά και των εμπορευμάτων που μεταφέρουν, κατά τη σύγκρουσή τους. Στις μέρες μας υπάρχει η τάση για την παραγωγή ελαφρότερων δομών, που συνεπάγεται αυξημένες σχεδιαστικές απαιτήσεις. Αυτό συμβαίνει διότι ένας από τους τρόπους μείωσης του βάρους είναι η χρήση λιγότερου υλικού, με αποτέλεσμα οι τάσεις λειτουργίας να πλησιάζουν, ολοένα και περισσότερο, στο όριο θραύσης του υλικού. [4]

1.3.2. Η κατάσταση στην Ελλάδα

Στατιστικά στοιχεία προερχόμενα από την Παγκόσμια Τράπεζα φανερώνουν ότι τα τροχαία ατυχήματα κοστίζουν από 1% έως 3% του ΑΕΠ κάθε χώρας. Ειδικότερα, η Ευρωπαϊκή Ένωση διαθέτει το ποσό των 160 δισ. ευρώ, που αντιστοιχεί σε 2% του ΑΕΠ για το έτος 2015. Στην Ελλάδα, ετησίως χάνουν τη ζωή τους περίπου 1600 άνθρωποι, με τους σοβαρά τραυματισμένους να στοιχίζουν περίπου 30.000 ευρώ, ενώ αυτοί που τραυματίζονται ελαφρά, 3.000 ευρώ. Στον πίνακα 1.3 παρουσιάζεται ο αριθμός των ατυχημάτων και παθόντων ανά έτος, την περίοδο 2000-2010. Η χώρα μας δαπανά περισσότερα από 14.000.000 ευρώ σε συντάξεις, νοσηλεία, αποκατάσταση ζημιών κτλ. που προέρχονται από τροχαία ατυχήματα. Αυτά τα χρήματα δεν περιλαμβάνουν τους εργαζόμενους που απασχολούνται για την αντιμετώπιση των παραπάνω συνεπειών (γιατροί, νομικοί, πραγματογνώμονες κτλ.). Τα έξοδα αυτά επιβαρύνουν ακόμα περισσότερο την Ελληνική οικονομία.

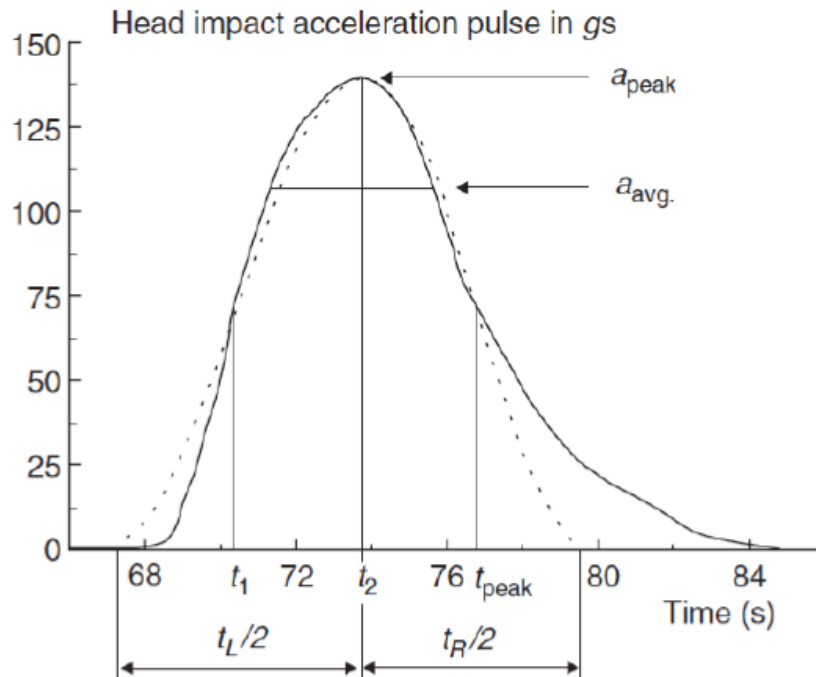
Έτος	Ατυχήματα			Παθόντες		
	Θανατηφόρα	Σοβαρά	Ελαφρά	Νεκροί	Βαριά τραυματίες	Ελαφρά τραυματίες
2000	1.458	2.037	13.261	2.103	4.213	26.166
2001	1.712	2.512	15.446	1.911	3.251	22.758
2002	1.458	2.037	13.261	1.655	2.581	19.625
2003	1.409	1.824	12.514	1.613	2.345	18.218
2004	1.374	2.032	11.993	1.547	2.521	17.254
2005	1.311	1.861	13.488	1.470	2.327	19.133
2006	1.351	1.681	12.620	1.493	19.898	2.056
2007	1.292	1.462	11.872	1.449	18.223	1.812
2008	1.414	1.542	12.035	1.550	1.886	16.685
2009	1.314	1.389	12.072	1.463	1.669	16.683
2010	1.162	1.454	12.456	1.281	1.754	17.024

Πίνακας 1.3: Αριθμός των ατυχημάτων και παθόντων ανά έτος την περίοδο 2000-2010.

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας κατατάσσει την Ελλάδα στην τρίτη θέση, ανάμεσα στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που αφορά θανάτους από τροχαία ατυχήματα, για ηλικίες μέχρι 25 ετών (αντιστοιχεί σε 14 θανάτους ανά 100.000 άτομα). Η Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδος αναφέρει ότι οι 450 από τους 1600 θανάτους που προαναφέραμε, αφορούν ανθρώπους ηλικίας έως 25 ετών. [5]

1.3.3. Συνέπειες ατυχημάτων στον ανθρώπινο οργανισμό

Είναι γνωστό, πως όταν συγκρούεται ένα όχημα, ο χρόνος που μεσολαβεί είναι πολύ μικρός. Προκειμένου να μεταβληθεί η ορμή ($m*u$), στην αρχή παράγεται μία μέση δύναμη (F) που διαρκεί χρόνο (t) και αναπτύσσεται στις συγκρουόμενες επιφάνειες. Αυτή η μέση δύναμη είναι αντιστρόφως ανάλογη προς τον χρόνο διότι ισχύει, ($F=m*u/t$), πράγμα που σημαίνει ότι όσο πιο μικρό είναι το (t) τόσο μεγαλύτερη δύναμη (F) θα προκληθεί. Ανάλογα με το μέγεθος αυτής της δύναμης, θα αναπτυχθεί αντίστοιχη επιβράδυνση στα σώματα των επιβατών (ειδικά στα κεφάλια τους που δε συγκρατούνται από τις ζώνες ασφαλείας). Η εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζει την καμπύλη επιβράδυνσης των κεφαλιών των επιβατών σε δοκιμή πρόσκρουσης αυτοκινήτου (crash test). [3]



Εικόνα 1.1: Τυπικός ρυθμός επιβράδυνσης που αναπτύσσεται σε crash test.

Η επιβράδυνση μπορεί να προκαλέσει σημαντική ζημιά σε ανθρώπους και κατασκευές. Οι συνέπειες μιας σύγκρουσης οχήματος μπορούν να χωρισθούν στις εξής κατηγορίες :

- Τραυματισμός ανθρώπων ή ακόμα και ζώων. Ο τραυματισμός μπορεί να είναι φυσικός ή και ψυχολογικός και αφορά πεζούς ή επιβαίνοντες.
- Ζημιά που αφορά την κατασκευή. Πέρα από την πλαστική παραμόρφωση ή θραύση του οχήματος, συμπεριλαμβάνονται και καταστροφές από πιθανή πυρκαγιά προερχόμενη από τη σύγκρουση.
- Ζημιά που αφορά το φορτίο και προέρχεται από τη μεγάλη επιβράδυνση που αναπτύσσεται κατά τη σύγκρουση.
- Περιβαλλοντική ζημιά (π.χ. η ζημιά στα δέντρα, διαρροές πετρελαίου από σύγκρουση πλοίου κλπ.).

Ειδικά στην περίπτωση Α, αν συμβεί σύγκρουση που να επιφέρει μεγάλη επιβράδυνση, είναι πολύ πιθανό τα κεφάλια των επιβατών να προσκρούσουν στο εσωτερικό του οχήματος. Αυτό, καλείται δευτερεύουσα σύγκρουση και μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα επικίνδυνη. [3],[6]

2. Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

2.1. Γενικά

Για την επίλυση τεχνικών προβλημάτων αρχικά κατασκευάζουμε το μαθηματικό μοντέλο κάνοντας κάποιες παραδοχές για την απλούστευση της διαδικασίας. Συνήθως, η τελική μαθηματική έκφραση αποτελείται από διαφορικές εξισώσεις και αρχικές συνθήκες. Σε πολύπλοκα προβλήματα, αυτές οι διαφορικές εξισώσεις είναι δύσκολο να επιλυθούν αναλυτικά και πολλές φορές είναι ακατόρθωτο. Στις περιπτώσεις αυτές, τα προβλήματα λύνονται με αριθμητικές μεθόδους που δίνουν μεν προσεγγιστικές λύσεις αλλά τα αποτελέσματά τους είναι αξιόπιστα. Από τις πιο διαδεδομένες αριθμητικές μεθόδους επίλυσης τεχνικών προβλημάτων είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method).

Η FEM μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα, γράφοντας ένα γενικό πρόγραμμα με προκαθορισμένες αρχικές συνθήκες. Το σκεπτικό πίσω από αυτήν τη μέθοδο είναι ο διαχωρισμός της υπό εξέταση περιοχής, σε πολλές μικρότερες που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Όταν πρωτοεμφανίστηκε η FEM, το βασικό της μειονέκτημα ήταν η απαίτηση μεγάλης υπολογιστικής ισχύος, όμως στις μέρες μας με τη ραγδαία ανάπτυξη των H/Y, αυτό το πρόβλημα έχει μετριαστεί σημαντικά.

Επιστήμονες όπως ο Ιωάννης Αργύρης, ο Ray W. Clough, ο Walter Ritz, ο Boris G. Galerkin και άλλοι, έθεσαν τις βάσεις για την εξέλιξη των μητρωικών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων, σε αυτό που ονομάζουμε σήμερα FEM.

Βήματα εφαρμογής της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων:

- 1) Σχεδιάζεται η υπό μελέτη γεωμετρία σε πρόγραμμα CAD και πραγματοποιείται το 3D μοντέλο.
- 2) Πραγματοποιείται διαμέριση του μοντέλου και εισάγονται τα απαιτούμενα δεδομένα. Τα προγράμματα που χρησιμοποιούνται γι' αυτήν τη διαδικασία ονομάζονται pre-processors.
- 3) Μετά την εισαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων ακολουθεί η διαδικασία της επίλυσης του προβλήματος. Αυτή πραγματοποιείται από προγράμματα που ονομάζονται solvers.
- 4) Όταν ολοκληρωθεί η επίλυση του προβλήματος, τα αποτελέσματα εισάγονται σε προγράμματα που ονομάζονται post-processors, ώστε ο μελετητής να δει και να επεξεργαστεί τα αποτελέσματα.

Ένα τέτοιο ολοκληρωμένο πακέτο για ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι το LS-DYNA από την εταιρεία Livermore Software Technology Corporation (LSTC). [2],[7]

2.2. Ls-Dyna

Το Ls-Dyna είναι ένα πακέτο προσομοίωσης γενικής χρήσης, την εταιρίας Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Καθώς στο πρόγραμμα προστίθενται ολοένα και περισσότερες δυνατότητες για την επίλυση διάφορων προβλημάτων, η βασική του ικανότητα είναι η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων σε μεταβατικά-δυναμικά προβλήματα που παρουσιάζουν έντονη μη γραμμικότητα. Η μη γραμμικότητα συνεπάγεται τουλάχιστον ένα από τα παρακάτω:

- Αλλαγή των συνοριακών συνθηκών κατά την επίλυση του προβλήματος

- Μεγάλες παραμορφώσεις (π.χ. κατάρρευση μεταλλικών κελυφών)

- Μη γραμμικά υλικά που δεν επιδεικνύουν τυπική ελαστική συμπεριφορά

Μεταβατικό δυναμικό φαινόμενο σημαίνει, ανάλυση μικρής διάρκειας γεγονότων που συμβαίνουν σε υψηλές ταχύτητες και οι αδρανειακές δυνάμεις είναι σημαντικές. Τέτοιες εφαρμογές είναι:

- Η σύγκρουση οχημάτων,

- Κατεργασίες υλικών

- Εκρήξεις

Το Ls-Dyna χρησιμοποιείται ευρέως από την αυτοκινητοβιομηχανία για την ανάλυση του σχεδιασμού οχημάτων. Έχει την ικανότητα να προσομοιάζει με ακρίβεια τη σύγκρουση ενός οχήματος, καθώς και να προβλέπει τις επιπτώσεις στους επιβάτες. Με αυτό το πρόγραμμα είναι δυνατή η δοκιμή των σχεδίων ενός αυτοκινήτου χωρίς να κατασκευαστεί πρωτότυπο και να διενεργηθεί crash test, εξοικονομώντας χρήματα και χρόνο.

Όπως αναφέραμε στα βήματα της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων, έτσι και στην περίπτωση του Ls-Dyna, για την επίλυση ενός προβλήματος χρειάζονται τέσσερις συνιστώσες (CAD, pre-processor, solver, post-processor). Η εταιρία LSTC πέρα από τον solver, ανέπτυξε το λογισμικό Ls-PrePost, που περιλαμβάνει τις υπόλοιπες τρείς συνιστώσες.[2],[8]

3. Συστήματα Απορρόφησης Ενέργειας (Energy Absorbing Systems)

3.1. Ορισμός

Ο απορροφητής ενέργειας είναι ένα σύστημα που μετατρέπει μέρος ή ολόκληρη την κινητική ενέργεια κατά τη σύγκρουση σε άλλη μορφή ενέργειας, όπου ιδανικά δε θα μπορεί να ανακτηθεί. Μη αντιστρεπτή (ανελαστική) ενέργεια μπορεί να υπάρξει σε διάφορες μορφές, όπως είναι η πλαστική παραμόρφωση, η ιξώδης ενέργεια, η ενέργεια τριβής ή η ενέργεια θραύσης. [9]

3.2. Γενικές αρχές

Από τη μέχρι τώρα εμπειρία, είναι προφανές ότι ο σχεδιασμός απορροφητών ενέργειας και τα «ενεργό-απορροφητικά» υλικά πρέπει να ταιριάζουν με τον σκοπό και τις συνθήκες που πρόκειται να λειτουργήσουν. Ο σχεδιασμός και η επιλογή μπορούν να ποικίλουν σημαντικά από εφαρμογή σε εφαρμογή, αλλά σε όλες τις περιπτώσεις ο στόχος παραμένει ο ίδιος, η διάχυση της κινητικής ενέργειας με έναν ελεγχόμενο τρόπο ή με ένα προκαθορισμένο ρυθμό. Επομένως, ισχύουν μερικές θεμελιώδεις αρχές για όλες τις εφαρμογές τέτοιου είδους και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν κατευθυντήριες γραμμές για τον σχεδιασμό ενός απορροφητή ενέργειας. Οι κυριότερες παρουσιάζονται παρακάτω.

- Μη αναστρέψιμη μετατροπή ενέργειας

Όπως αναφέραμε και στον ορισμό, η μετατροπή ενέργειας από κατασκευές/υλικά πρέπει να είναι μη αντιστρεπτή, γι' αυτό οι κατασκευές/υλικά πρέπει να είναι σε θέση να μετατρέπουν την περισσότερη από τη κινητική ενέργεια σε μη ελαστική ενέργεια μέσω πλαστικής παραμόρφωσης ή άλλης μορφής διαδικασία διάχυσης.

Γιατί η μετατροπή αυτή πρέπει να είναι μη ελαστική; Αν η αρχική κινητική ενέργεια (ή πιο γενικά η αρχική ενέργεια λόγω της δυναμικής φόρτισης) μετατραπεί σε ελαστική παραμόρφωση της κατασκευής, τότε μετά από την επίτευξη μίας μέγιστης ελαστικής παραμόρφωσης, η αποθηκευμένη ελαστική ενέργεια θα απελευθερωθεί και θα προκαλέσει μετέπειτα ζημιά σε αυτό που θα έπρεπε να προστατεύεται.

- Περιορισμένη και σταθερή δύναμη αντίδρασης (reactive force)

Η μέγιστη δύναμη αντίδρασης ενός απορροφητή ενέργειας θα πρέπει να διατηρείται κάτω από ένα όριο, και ιδανικά θα πρέπει να παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της παραμόρφωσης του, καθώς θα παρέχει επαρκή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κατά τη πρόσκρουση. Η μέγιστη δύναμη (και κατ' επέκταση η μέγιστη επιβράδυνση) της κατασκευής/υλικού απορρόφησης ενέργειας πρέπει να κρατηθεί κάτω από ένα όριο από το οποίο προκαλείται ζημιά ή τραυματισμός, γι' αυτό λοιπόν η δύναμη αντίδρασης πρέπει να παραμένει σταθερή ή σχεδόν σταθερή, ώστε να αποφεύγεται ένας υπερβολικά μεγάλος ρυθμός επιβράδυνσης.

- Μεγάλη διαδρομή

Όπως επισημάνθηκε παραπάνω, η δύναμη αντίδρασης για έναν απορροφητή ενέργειας πρέπει να είναι περιορισμένη και σταθερή, αλλά το έργο που προκαλείται από μία δύναμη είναι ίσο με το μέτρο της, πολλαπλασιασμένο με τη μετατόπιση της πάνω στη διεύθυνση που δρα. Γι' αυτό, αν η κατασκευή προορίζεται να απορροφά πολύ ενέργεια, η μετατόπιση (δηλ. η διαδρομή) πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη.

Εκτός από την τιμή της δύναμης, οι κατασκευές αυτές πρέπει να αναλύονται και από άποψη διάχυσης κινητικής ενέργειας. Όταν καθοριστεί η αρχική κινητική ενέργεια που θέλουμε να διαχυθεί, όσο περισσότερο χρόνο (t) διαθέτουμε τόσο μικρότερη είναι η δύναμη (F) που αναπτύσσεται. Αυτό οδηγεί στη φράση «αγοράζω απόσταση με τον χρόνο», ένα αξίωμα που πρέπει να ακολουθείται για τη μείωση ζημιάς/τραυματισμού από τη σύγκρουση. Για ομοιόμορφη επιβράδυνση από αρχική ταχύτητα (v) σε στάση, απαιτείται απόσταση ($vt/2$), και είναι αυτή η απόσταση που η δύναμη (F) δρα για τη διάχυση της κινητικής ενέργειας. Όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος που ασκείται η δύναμη (F), τόσο μικρότερη είναι η δύναμη που απαιτείται και κατά συνέπεια η ζημιά/τραυματισμός.

- Σταθερός και επαναλαμβανόμενος τρόπος παραμόρφωσης

Για την αντιμετώπιση αβέβαιων συνθηκών φόρτισης, ο τρόπος παραμόρφωσης και η ικανότητα διάχυσης ενέργειας του απορροφητή πρέπει να είναι σταθερά και επαναλαμβανόμενα έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία της κατασκευής.

Θα πρέπει να αναμένεται, ότι τα εξωτερικά δυναμικά φορτία που πρόκειται να δράσουν στις κατασκευές/υλικά απορρόφησης ενέργειας, είναι μεγάλης αβεβαιότητας ως προς το μέγεθός, το χρόνο δράσης, την κατεύθυνση και την κατανομή τους. Ως εκ τούτου, οι κατασκευές/υλικά θα πρέπει να κατέχουν σταθερό και επαναλαμβανόμενο τρόπο παραμόρφωσης που θα είναι ανθεκτικός στις παραπάνω αβεβαιότητες της φόρτισης, αλλά ταυτόχρονα θα πρέπει να εξασφαλίζουν την απαιτούμενη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

- Χαμηλό βάρος και υψηλή ειδική απορρόφηση ενέργειας

Το στοιχείο απορρόφησης ενέργειας πρέπει να είναι ελαφρύ και να διαθέτει μεγάλη ικανότητα διάχυσης ενέργειας (δηλ. διάχυση ανά μονάδα βάρους), που είναι ζωτικής σημασίας για απορροφητές ενέργειας τοποθετημένους σε οχήματα και συσκευές που εξασφαλίζουν την ασφάλεια του ανθρώπου. Τα σχέδια κατασκευής αυτοκινήτων τροποποιούνται συχνά με σκοπό τη βελτίωση της παθητικής τους ασφάλειας. Κάνοντας αυτό, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η πιθανή αύξηση βάρους, γιατί η μεταβολή στο βάρος συνεπάγεται και ομόσημη μεταβολή στην κατανάλωση καυσίμου άρα και μεγαλύτερη μόλυνση του περιβάλλοντος. Για διάφορες βοηθητικές, προστατευτικές συσκευές, το χαμηλό βάρος είναι μια εξαιρετικά σημαντική σχεδιαστική παράμετρος. Για παράδειγμα, σήμερα ένα τυπικό κράνος

ποδηλάτου που είναι διαθέσιμο στην αγορά ζυγίζει 250-300g, αλλά οι αναβάτες θα επιθυμούσαν ένα νέο τύπο κράνους που θα ζυγίζει κάτω από 200g.

Ανάμεσα σε πολλά υποψήφια υλικά για την απορρόφηση ενέργειας, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα κυψελωτά που αποτελούνται από ένα υλικό βάσης (π.χ. πολυμερές ή αλουμίνιο) και αέρα στις σχηματιζόμενες κυψέλες. Χάρη στο πορώδες τους είναι ελαφρύτερα από τα ομογενή υλικά, ενώ κάποιες φορές εμφανίζουν μεγαλύτερη δυσκαμψία και αντοχή ανά μονάδα όγκου. Με άλλα λόγια, σε σχέση με το υλικό βάσης, η μείωση σε μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζουν είναι συχνά μικρότερη από τη μείωση του βάρους. Στην πραγματικότητα, σε ότι αφορά την απορρόφηση ενέργειας, το πορώδες χαρακτηριστικό είναι επιθυμητό δεδομένου ότι μπορεί να δώσει μια μεγάλη διαδρομή και σχεδόν σταθερή δύναμη αντίδρασης

- Εύκολη εγκατάσταση και χαμηλό κόστος

Η παραγωγή, η εγκατάσταση και η συντήρηση τέτοιων απορροφητών ενέργειας πρέπει να είναι εύκολη και αποδοτική από άποψη κόστους.

Στον σημερινό ανταγωνιστικό κόσμο, ο σχεδιασμός ενός απορροφητή ενέργειας είναι πάντα περιορισμένος από τον διαθέσιμο προϋπολογισμό. Γι' αυτό, όλες οι προστατευτικές κατασκευές πρέπει να λειτουργούν εντός οικονομικών ορίων. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για συσκευές απορρόφησης ενέργειας που είναι συνήθως μίας χρήσης. (δηλ. άπαξ και παραμορφωθούν απορρίπτονται και αντικαθίστανται).

Στις επόμενες υποπαραγράφους, θα ασχοληθούμε μόνο με τους απορροφητές ενέργειας που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια σε πλαστικό έργο (δηλαδή μέσω της παραμόρφωσης του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένοι). [3]

3.3. Μέθοδοι κατάρρευσης κελυφών λεπτού πάχους

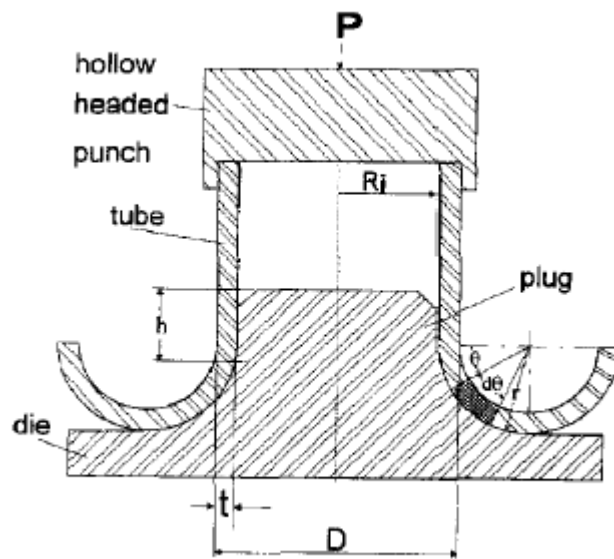
Τα λεπτότοιχα κελύφη μπορούν να μετατρέψουν την κινητική ενέργεια σε πλαστικό έργο καταρρέοντας με διάφορους τρόπους. Οι κυριότερες παρουσιάζονται παρακάτω.

3.3.1. Αναστροφή (inversion)

Εσωτερική αναστροφή είναι η διαδικασία που μετατρέπει την εξωτερική επιφάνεια ενός κυκλικού σωλήνα από όγκιμο υλικό σε εσωτερική. Η αντίστροφη διαδικασία, δηλ. η μετατροπή της εσωτερικής επιφάνειας σε εξωτερική, ονομάζεται εξωτερική αναστροφή. Στις δύο παραπάνω περιπτώσεις η παραμόρφωση επιτυγχάνεται με την επιβολή αξονικού θλιπτικού φορτίου. [4]

Κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η σταθερή δύναμη αντίδρασης καθ' όλη τη διάρκεια της κατάρρευσης. Περιορισμός υπάρχει από την ακτίνα της μήτρας, αν είναι μικρή θα συμβεί προοδευτικός λυγισμός, ενώ αν είναι μεγαλύτερη από ένα όριο τότε θα συμβεί απόσχιση (tearing/splitting) του σωλήνα. Η μέθοδος αυτή πρωτοπαρουσιάστηκε από την General Motors το 1969. Στην παρακάτω εικόνα

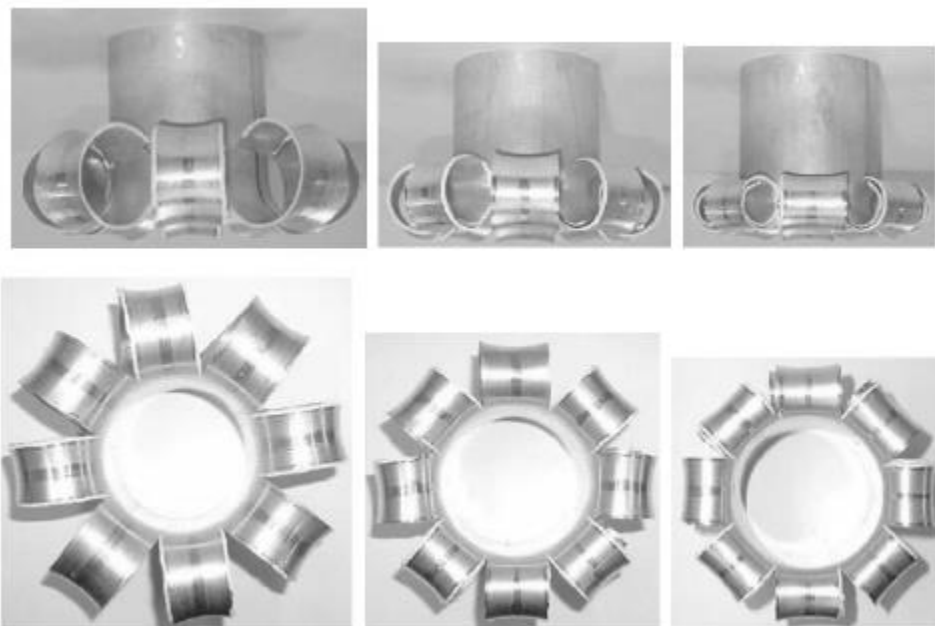
παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση της αναστροφής σωλήνα σε τομή. [4],[10],[12]



Εικόνα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση της αναστροφής σωλήνα σε τομή. [11]

3.3.2. Αξονικός διαχωρισμός (tearing/splitting)

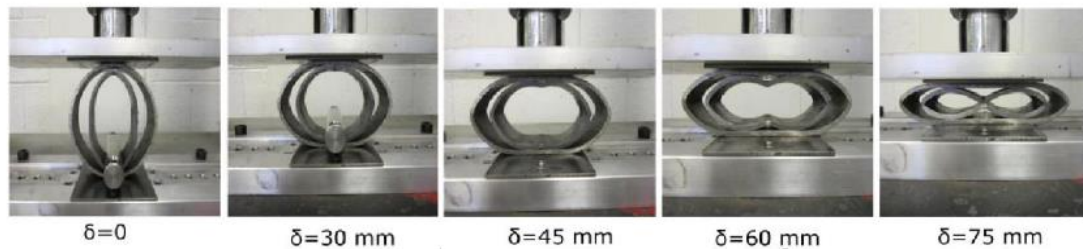
Είναι ειδική περίπτωση της αναστροφής όταν η ακτίνα της μήτρας είναι αρκετά μεγάλη. Στην περίπτωση αυτή αντί για αναστροφή προκαλείται απόσχιση. Στην εικόνα 3.2 παρουσιάζεται ο αξονικός διαχωρισμός σωλήνα κυκλικής διατομής.



Εικόνα 3.2: Αξονικός διαχωρισμός σωλήνα κυκλικής διατομής.

3.3.3. Πλευρική κατάρρευση (lateral compression/flattening)

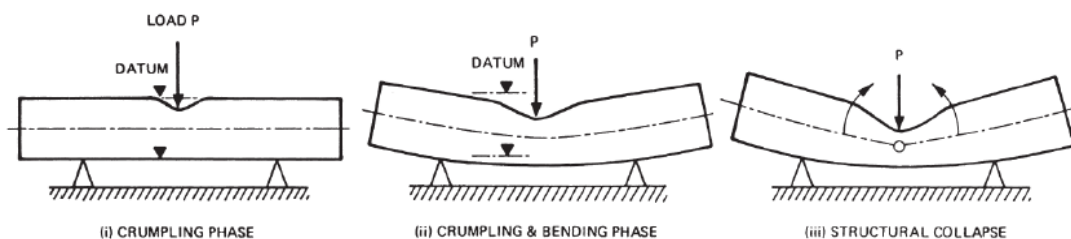
Είναι η πλευρική άσκηση φορτίου καθ' όλο το μήκος του κελύφους μέχρι την τελική κατάρρευση και η περίπτωση με την οποία ασχολούμαστε. Η εικόνα 3.3 δείχνει την προοδευτική πλευρική κατάρρευση σωλήνων κυκλικής διατομής.



Εικόνα 3.3: Προοδευτική πλευρική κατάρρευση σωλήνων κυκλικής διατομής. [13]

3.3.4. Πλευρική άσκηση σημειακού φορτίου (lateral indentation)

Είναι υποπερίπτωση του παραπάνω τρόπου κατάρρευσης. Στην περίπτωση αυτή το πλευρικό φορτίο ασκείται σε ένα σημείο του κελύφους και όχι ομοιόμορφα σε όλο του το μήκος. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση πλευρικής άσκησης σημειακού φορτίου σε απλά εδραζόμενο σωλήνα.

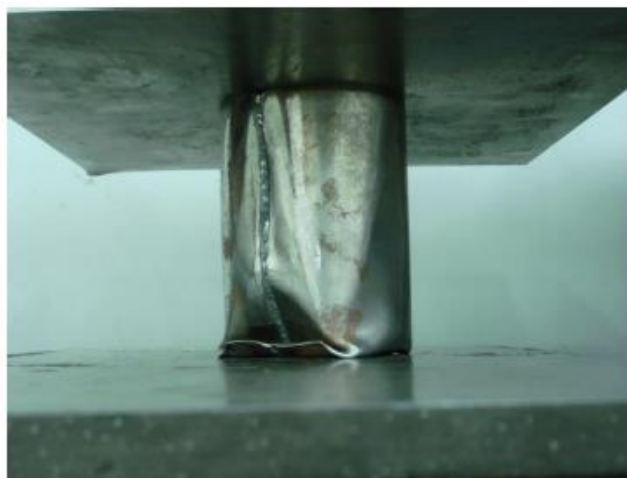


Εικόνα 3.4: Σχηματική αναπαράσταση πλευρικής άσκησης σημειακού φορτίου σε απλά εδραζόμενο σωλήνα. [14]

3.3.5. Αξονική κατάρρευση (axial crushing)

Όπως στην περίπτωση της αναστροφής και του αξονικού διαχωρισμού, έτσι και στην περίπτωση της αξονικής κατάρρευσης το θλιπτικό φορτίο ασκείται αξονικά με τη μόνη διαφορά ότι στην κατάρρευση του κελύφους δε συμμετέχει η μήτρα. Σε μια δοκιμή αξονικής καταπόνησης η ενέργεια η οποία απορροφάται από το δοκίμιο κατά τη διαδικασία αστοχίας και κατάρρευσης μπορεί να υπολογιστεί από το εμβαδόν του χωρίου κάτω από την καμπύλη φορτίου - βράχυνσης δοκιμίου (μετατόπισης). Αρχικά το κέλυφος παραμορφώνεται ελαστικά ενώ το φορτίο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, σχεδόν γραμμικά, μέχρι μια μέγιστη τιμή P_{max} . Το μέγεθος αυτής της μέγιστης τιμής εξαρτάται από την γεωμετρία του κελύφους και τα χαρακτηριστικά του υλικού. Όταν φτάσει αυτή την τιμή το φορτίο παρουσιάζει απότομη πτώση. Καθώς συνεχίζεται η

παραμόρφωση η μορφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης εξαρτάται από τον τρόπο κατάρρευσης και τις συνθήκες φόρτισης. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η αξονική κατάρρευση λεπτότοιχου κελύφους υπό την επενέργεια θλιπτικού φορτίου.



Εικόνα 3.5: Αξονική κατάρρευση λεπτότοιχου κελύφους

3.3.6. Σύγκριση αξονικά και πλευρικά καταπονούμενων σωλήνων

Οι αξονικά φορτιζόμενοι σωλήνες έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως ως δομές απορρόφησης ενέργειας, και έχουν λάβει σημαντική προσοχή από τους ερευνητές, λόγω του γεγονότος ότι οι σωλήνες σε αξονική θλίψη έχουν συγκριτικά υψηλή ικανότητα απορρόφησης. Αυτό, οφείλεται στο ότι κατά την αξονική φόρτιση, το περισσότερο υλικό του σωλήνα παραμορφώνεται πλαστικά, συμβάλλοντας έτσι σημαντικά στην απορρόφηση. Χαρακτηριστικό είναι ότι σε σύγκριση μεταξύ αξονικής και πλευρικής συμπίεσης, προέκυψε ότι κατά την αξονική συμπίεση παρουσιάστηκε περίπου 10 φορές μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας από την πλευρική.

Ωστόσο αυτές οι δομές έχουν ορισμένα μειονεκτήματα, όπως οι πολύ μεγάλες διακυμάνσεις του φορτίου, καταρρεύσεις σε σχέση με το μέσο φορτίο και πολύ ασταθείς λειτουργίες παραμόρφωσης. Το μέγεθος της ενέργειας απορρόφησης που μπορούν να απορροφήσουν πλευρικά πεπλατυσμένοι σωλήνες, βρέθηκαν να είναι μεγαλύτερη από εκείνη των σωλήνων με πλευρικές εσοχές, αλλά όχι τόσο όση αυτών με την αξονική σύνθλιψη.

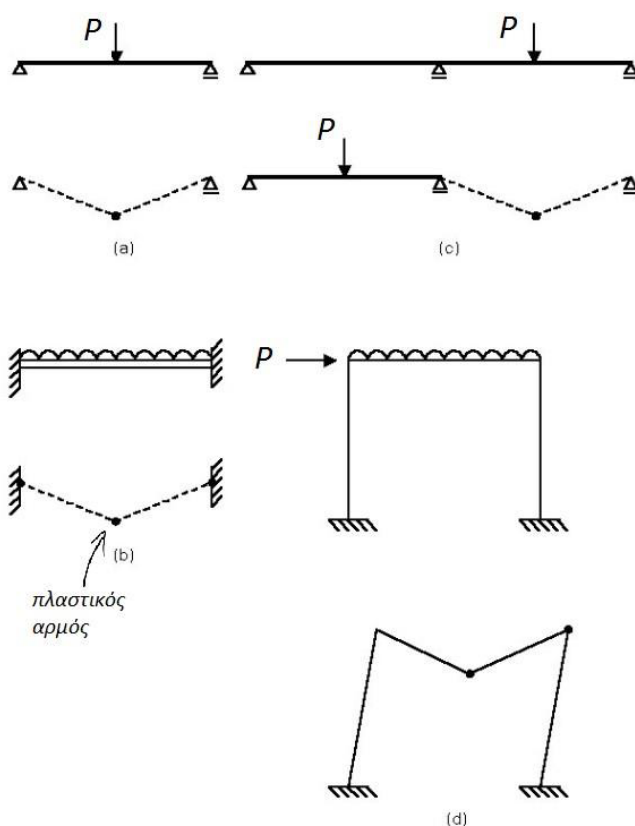
Το κύριο πλεονέκτημα των πλευρικά φορτισμένων σωλήνων είναι ότι η κατάσταση της κατάρρευσης σε κάμψη που παράγεται από πλευρική (lateral) φόρτιση, γίνεται με μια ομαλή απόκριση της δύναμης με την παραμόρφωση. Ακόμα, οι πλευρικά φορτιζόμενοι σωλήνες δεν υφίστανται κανενός είδους ασταθή παραμόρφωση ακόμα και όταν αυτοί φορτίζονται εκτός άξονα. Παρά αυτά τα πλεονεκτήματα, οι σωληνώσεις σε πλευρική φόρτιση έχουν λάβει σχετικά περιορισμένη προσοχή στην ερευνά σχετικά με τους απορροφητές ενέργειας.

4. Στοιχεία Θεωρίας

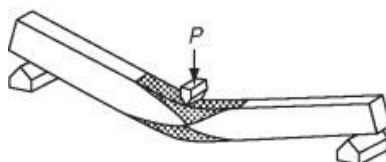
4.1. Ορισμοί – Συμπληρωματικές έννοιες

4.1.1. Πλαστικός αρμός (Plastic hinge)

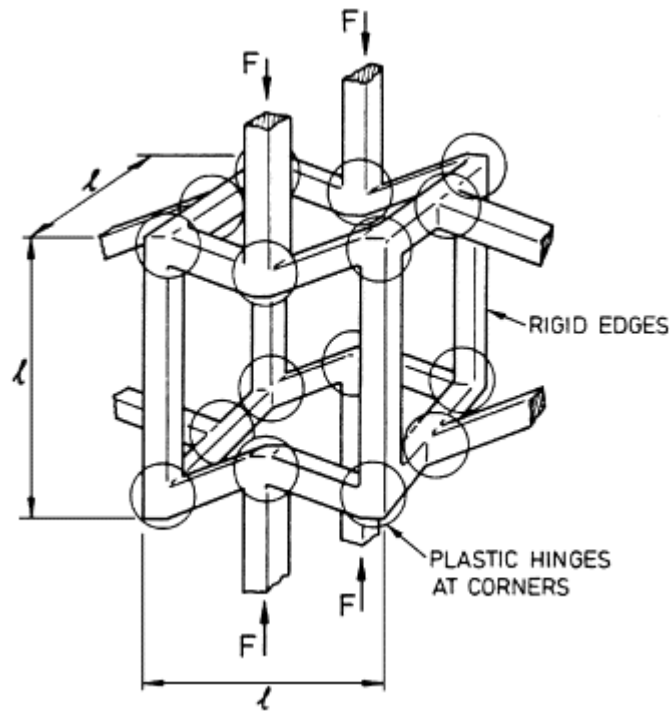
Ο πλαστικός αρμός επιτρέπει μεγάλες περιστροφές με σταθερή ανθιστάμενη ροπή, τη ροπή πλήρους πλαστικοποίησης M_p . Οι πλαστικοί αρμοί εκτείνονται σε μικρού μήκους τμήματα πάνω στον φορέα και οι πραγματικές τιμές του έχουν άμεση εξάρτηση από την κατανομή του φορτίου και τη διατομή του φορέα. Λεπτομερής ανάλυση έχει δείξει ότι είναι μια καλή προσέγγιση να θεωρήσουμε τους φορείς άκαμπτους-ιδεωδώς πλαστικούς με την πλαστικότητα να βρίσκεται στους πλαστικούς αρμούς.



Εικόνα 4.1: Πλαστικοί αρμοί σε διάφορους μηχανισμούς κατάρρευσης. [15]



Εικόνα 4.2: Σχηματισμός πλαστικού αρμού σε δοκό. [16]



Εικόνα 4.3: Σχηματισμός πλαστικών αρμών σε διάταξη δοκών.

4.1.2. Ροπή πλήρους πλαστικοποίησης (M_p)

Η ροπή που ολόκληρη η διατομή έχει φτάσει στο όριο διαρροής ονομάζεται ροπή πλήρους πλαστικοποίησης M_p και για δεδομένη διατομή είναι πάντα μεγαλύτερη από την ροπή διαρροής (την καμπτική ροπή που ένα μέρος της διατομής αγγίζει το όριο διαρροής ενώ η υπόλοιπη έχει μικρότερη τάση). Για γραμμικούς φορείς αυτό το όριο είναι το όριο διαρροής σε μονοαξονικό εφελκυσμό (σ_y), ενώ για τους επιφανειακούς φορείς χρησιμοποιείται το ισοδύναμο όριο διαρροής $\sigma_0=2/\sqrt{3}\sigma_y$ (κριτήριο Von Mises για επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση). Η ροπή πλήρους πλαστικοποίησης εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$M_p = \sigma_0 \int_{t_1}^{t_2} y \, dy,$$

όπου:

- y είναι η απόσταση από το ουδέτερο επίπεδο,
 - t_1, t_2 είναι οι αποστάσεις από το ουδέτερο επίπεδο και $t=(t_1+t_2)$ είναι το πάχος του φορέα,
 - για γραμμικούς φορείς ισχύει για το όριο διαρροής σε μονοαξονικό εφελκυσμό: $\sigma_0=\sigma_y$,
 - για επιφανειακούς φορείς ισχύει για το ισοδύναμο όριο διαρροής: $\sigma_0=2/\sqrt{3}\sigma_y$.
- [2],[15]

Στην οριακή ανάλυση δομικών φορέων που υπόκεινται κάμψη, μια απότομη μετάβαση από την ελαστική στην ιδεωδώς πλαστική συμπεριφορά εμφανίζεται όταν η καμπτική ροπή πάρει συγκεκριμένη τιμή, την τιμή της ροπής πλήρους πλαστικοποίησης. Μέχρι τότε η συμπεριφορά του φορέα θεωρείται ελαστική, ενώ όταν γίνει M_p σχηματίζεται πλαστικός αρμός.

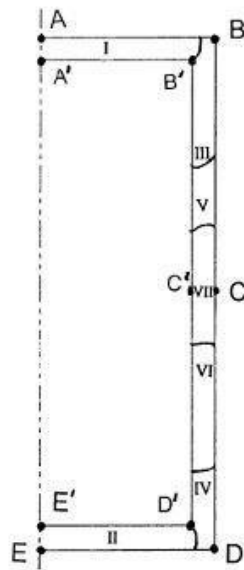
4.2. Θεωρητική προσέγγιση του μηχανισμού κατάρρευσης

Η συνολική ανάλυση της ολικής παραμόρφωσης ακόμα και της απλούστερης κατασκευής είναι πολύ περίπλοκη. Γι' αυτό το λόγο συνήθως χρησιμοποιούνται απλουστευτικές υποθέσεις οι οποίες οδηγούν σε κατά προσέγγιση εκφράσεις της σχέσης φορτίου-παραμόρφωσης.

Ειδικότερα, όταν η κάμψη είναι η λειτουργία που κυριαρχεί κατά την παραμόρφωση του δοκιμίου, είναι το πλέον σύνηθες να υποθέτουμε ότι το υλικό είναι τέλεια πλαστικό και ότι δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις –άξονες- σε κρίσιμα τμήματα της σωλήνωσης. Η γεωμετρία της δομής τροποποιείται με την παραδοχή ότι τα άκαμπτα τμήματα υποβάλλονται σε περιορισμένες περιστροφές γύρω από τις πλαστικές αρθρώσεις και έτσι το φορτίο μπορεί να αυξηθεί πέρα από το όριο κατάρρευσης του υλικού.

4.3. Πλευρική κατάρρευση σωλήνων ορθογωνικής και τετραγωνικής διατομής

Για τη μελέτη σωλήνων ορθογωνικής και τετραγωνικής διατομής είναι βολικό να χωριστεί η διαδικασία παραμόρφωσης σε τρία στάδια: αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό. Επίσης θα μελετηθεί μόνο το δεξί μισό μέρος των σωλήνων αφού είναι συμμετρικοί ως προς το διαμήκη άξονά τους. Έτσι χωρίζουμε ένα σωλήνα στη μέση (ζώνες I έως VII) και ορίζουμε τα σημεία A, B, C, D, E και τα A', B', C', D', E' που βρίσκονται στην εξωτερική και εσωτερική πλευρά του σωλήνα αντίστοιχα όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 4.4: Διατομή σωλήνα ορθογωνικής διατομής πριν τη συμπίεση (ζώνες και σημεία ενδιαφέροντος).

Στην αρχή της διαδικασίας οι πάνω και κάτω επιφάνειες του σωλήνα (AB και DE) βρίσκονται σε επαφή με την άνω και κάτω πλάκα αντίστοιχα. Σε αυτή τη φάση, μπορούμε να θεωρήσουμε τις πάνω και κάτω πλευρές ως δοκούς που δέχονται καταναμημένο φορτίο καθ' όλο το μήκος τους. Οι δοκοί φέρουν δύο στηρίξεις στα άκρα τους και (τις κατακόρυφες πλευρές) και η συνεχιζόμενη συμπίεση προκαλεί κάμψη των φορτισμένων δοκών αλλά και λυγισμό των κατακόρυφων πλευρών. Τα κεντρικά σημεία των δύο δοκών χάνουν αρχικά επαφή με τις πλάκες.

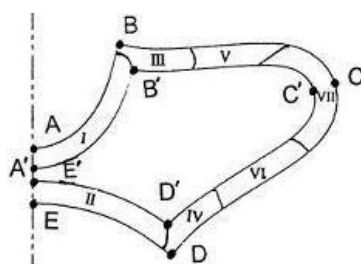
Με την περαιτέρω συμπίεση η περιοχή της επαφής σταδιακά μειώνεται μέχρις ότου να περιοριστεί σε μια μικρή περιοχή μεταξύ των ακραίων σημείων B και D. Καθώς η παραμόρφωση εξελίσσεται, η τριβή μεταξύ της διεπιφάνειας σωλήνα-πλακών αντιστέκεται στην κάμψη των οριζόντιων πλευρών. Οι λεγόμενοι πλαστικοί αρμοί σχηματίζονται στα σημεία τομής των κάθετων και οριζόντιων πλευρών B και D. Στη συνέχεια αρχίζει να εμφανίζεται το φαινόμενο του λυγισμού στις κατακόρυφες πλευρές όπου και αναπτύσσεται ένα δεύτερο σύνολο πλαστικών αρμών.

Δεδομένου ότι η κάμψη στις άνω και κάτω πλευρές του σωλήνα είναι διαφορετική λόγω του άνισου πάχους τους, η θέση των πλαστικών αρμών δεν είναι στο μέσο του ύψους του. Έτσι η απόσταση του αρμού από το παχύτερο οριζόντιο τοίχωμα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το λεπτότερο και αντιστρόφως. Στο τέλος της αρχικής φάσης της διαδικασίας συμπίεσης, οι πλαστικοί αρμοί έχουν αναπτυχθεί πλήρως στα σημεία τομής των κάθετων και οριζόντιων πλευρών B και D. Ωστόσο ο σχηματισμός των πλαστικών αρμών στη ζώνη VII βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο. Το φορτίο στις πλάκες παίρνει μια μέγιστη τιμή λίγο πριν την έναρξη του λυγισμού στη ζώνη VII.

Κατά το ενδιάμεσο στάδιο της συμπίεσης, η μεταφορά του φορτίου από τις πλάκες στο σωλήνα γίνεται μέσα σε μικρές περιοχές γύρω από τα σημεία B και D. Περαιτέρω παραμόρφωση εντοπίζεται κυρίως μέσα στην ζώνη VII. Ο σωλήνας γύρω από την ζώνη VII κινείται συνεχώς προς τα έξω, με αποτέλεσμα ο λεγόμενος μοχλοβραχίονας (δηλαδή η απόσταση μεταξύ του σημείου δράσης του φορτίου και του κέντρου της ζώνης VII) να αυξάνει συνεχώς. Ως εκ τούτου, το φορτίο της πλάκας τείνει να μειωθεί και συνεπώς η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης παρουσιάζει αρνητική κλίση. Στο τέλος του ενδιάμεσου σταδίου, ο λυγισμός των κατακόρυφων προχωρά τόσο πολύ ώστε το τμήμα BC γίνεται σχεδόν επίπεδο και στιγμιαία έρχεται σε επαφή με τις πλάκες.

Ακριβώς μετά, η επαφή σωλήνα-πλάκας μετατοπίζεται απότομα από το σημείο B προς το σημείο C (κοντά στον αρμό στο σημείο C). Τώρα το φορτίο των πλακών αρχίζει να αυξάνεται σχετικά απότομα μέχρι να φτάσει μια δεύτερη κορυφή.

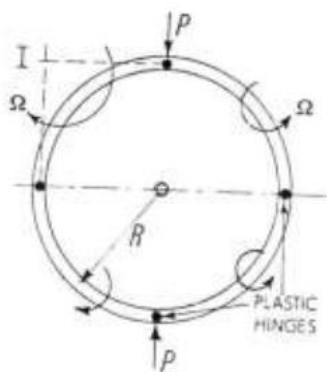
Ωστόσο η δεύτερη αυτή κορυφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης ποτέ δεν φτάνει το ύψος της πρώτης. Ο αρμός στο σημείο C προσπαθεί να κυλήσει προς τη ζώνη VI. Περαιτέρω παραμόρφωση εντοπίζεται στις περιοχές γύρω από το σημείο C. Το φορτίο αρχίζει να μειώνεται και πάλι και η παραμόρφωση συνεχίζεται με τη μείωση του φορτίου μέχρι οι άνω και κάτω πλευρές να έρθουν σε επαφή μεταξύ τους.



Εικόνα 4.5: Διατομή σωλήνα ορθογωνικής διατομής μετά τη συμπίεση (ζώνες και σημεία ενδιαφέροντος)

4.4. Πλευρική κατάρρευση σωλήνων κυκλικής διατομής

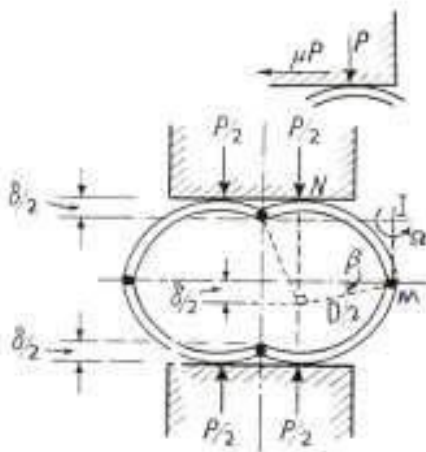
Ένας λεπτός κυκλικός σωλήνας δεν είναι αρκετά εύκαμπτος όσον αφορά την μέση ακτίνα -R- όταν αυτός υποβάλλεται σε φορτίο -P- κατά την διάμετρο του και μπορεί να καταρρεύσει πλαστικά μόνο όταν δημιουργηθούν τέσσερις τέτοιες αρθρώσεις, που θα του επιτρέψουν να λειτουργήσει σαν ένας μηχανισμός. Αυτές οι αρθρώσεις συμπεραίνουμε ότι εμφανίζονται στις περιοχές όπου παρουσιάζεται η μέγιστη ελαστικότητα.



Εικόνα 4.6: Σημεία εμφάνισης πλαστικών αρθρώσεων σε κυκλικούς σωλήνες.

Εάν το κέντρο του σωλήνα παραμένει σταθερό, τότε κατά την κατάρρευση, τα τέσσερα αυτά άκαμπτα τμήματα που υπάρχουν μεταξύ των αρθρώσεων περιστρέφονται με γωνιακή ταχύτητα Ω γύρω από ένα στιγμιαίο κέντρο – I – και η δύναμη - P – κινείται προς το κέντρο του σωλήνα με ταχύτητα $R \cdot \Omega$.

Όταν μια συνεχιζόμενη, οιονεί-στατική θλίψη ενός σωλήνα πραγματοποιείται μεταξύ παράλληλων και άκαμπτων επιφανιών, είναι προφανές ότι η δύναμη σύνθλιψης -P- αυξάνεται ταυτόχρονα με την μείωση της κάθετης διαμέτρου του δοκιμίου. Όσο η κάθετη παραμόρφωση συνεχίζεται, παρατηρούμε ότι οι αρχικές τέσσερις αρθρώσεις παραμένουν, αλλά τα σημεία όπου εφαρμόζονται οι δυνάμεις συμπίεσης απομακρύνονται από την κεντρική γραμμή χωριζόμενες σε δυο ίσες συνιστώσες $P/2$. Ενδεικτικά η παραμόρφωση αναμένεται να είναι όπως στο σχήμα



Εικόνα 4.7: Διαδικασία παραμόρφωσης σε κυκλικούς σωλήνες.

Κάθε τέταρτο του δακτυλίου του σωλήνα μπορεί να θεωρηθεί ότι περιστρέφεται γύρω από το παραμένον άκαμπτο τμήμα.

4.4.1. Ανάλυση της ισοδύναμης παραμόρφωσης στα χαρακτηριστικά σημεία

Η πλευρική συμπίεση ενός σωλήνα κυκλικής διατομής απεικονίζεται ως ένα πρόβλημα επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης η οποία παρουσιάζει διπλή συμμετρία της παραμόρφωσης. Έτσι μελετάται μόνο το άνω δεξιά τμήμα του σωλήνα και ονομάζεται τομέας, ο οποίος χωρίζεται σε τρεις ζώνες (I, II και III).

Μπορεί κανείς να επισημάνει δώδεκα χαρακτηριστικά σημεία (A_1 , A_2 , A_3 , G_1 , G_2 , G_3 , H_1 , H_2 , H_3 , B_1 , B_2 , και B_3) και δύο ευθείες (A_1A_3 και B_1B_3).

Τα σημεία A_2 , G_2 , H_2 και B_2 βρίσκονται στο κέντρο των ευθειών A_1A_3 , G_1G_3 , H_1H_3 και B_1B_3 αντίστοιχα.

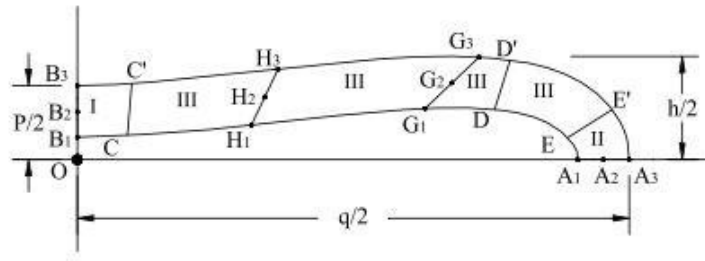
Οι ευθείες H_1H_3 και G_1G_3 βρίσκονται υπό κλίση 60° και 30° αντίστοιχα σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα (εικόνα 4.8).

Η ισοδύναμη παραμόρφωση στα σημεία A_1 , A_2 και A_3 αυξάνεται κατά τη διαδικασία της συμπίεσης. Συγκρίνοντας τις τρεις τιμές μεταξύ τους μπορεί κανείς να δει ότι αυτή του σημείου A_1 είναι η μεγαλύτερη, του A_2 έχει μια μέση τιμή και του A_3 είναι μικρότερη. Αυτό υποδεικνύει πως ο σωλήνας υπόκειται σε συμπίεση και κάμψη. Η αύξηση των τιμών της ισοδύναμης παραμόρφωσης εμφανίζεται λόγω ύπαρξης αυξανόμενης αξονικής δύναμης και κάμψης στην ευθεία A_1A_3 .

Στα σημεία G_1 , G_2 και G_3 η ισοδύναμη παραμόρφωση παραμένει σχεδόν ίση με το μηδέν μέχρι ένα στάδιο της συμπίεσης και έπειτα αυξάνει απότομα. Αυτή η διακύμανση δείχνει πως η περιοχή γύρω από την ευθεία G_1G_3 μένει απαραμόρφωτη πριν από αυτό το στάδιο της συμπίεσης και στη συνέχεια η παραμόρφωση αυξάνει στην γύρω περιοχή. Η θέση της ευθείας G_1G_3 σε αυτό το στάδιο παραμένει ακριβώς αριστερά από το σημείο επαφής σωλήνα-πλάκων.

Η ισοδύναμη παραμόρφωση στα σημεία H_1 και H_3 παραμένει αρχικά σχεδόν ίση με το μηδέν μέχρι ένα στάδιο της συμπίεσης. Έπειτα ξαφνικά αρχίζει να αυξάνει. Με περεταίρω συμπίεση η ισοδύναμη παραμόρφωση των δύο σημείων μειώνεται ξανά και τελικά παίρνει πάλι σχεδόν μηδενική τιμή. Η ισοδύναμη παραμόρφωση στο σημείο H_2 παραμένει μηδέν καθ' όλη τη διάρκεια της συμπίεσης.

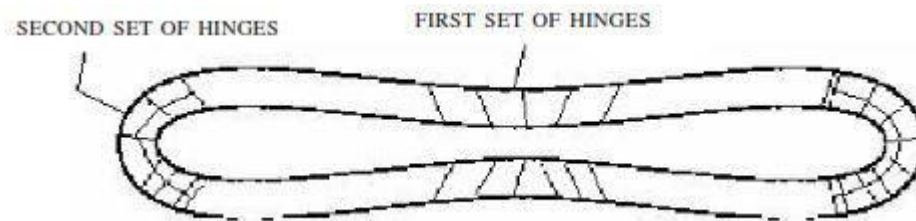
Με την εφαρμογή πλευρικής συμπίεσης η ισοδύναμη παραμόρφωση στα σημεία B_1 και B_3 αρχικά αυξάνεται ομοιόμορφα και στη συνέχεια μειώνεται πλησιάζοντας το μηδέν. Η ισοδύναμη παραμόρφωση στο σημείο B_1 είναι σχετικά με αυτή του σημείου B_3 μεγαλύτερη. Αυτό ισχύει γιατί το σημείο B_3 είναι πιο κοντά στις πλάκες.



Εικόνα 4.8: Διατομή σωλήνα κυκλικής διατομής μετά την συμπίεση (ζώνες και σημεία ενδιαφέροντος)

4.4.2. Ανάπτυξη πλαστικών αρμών

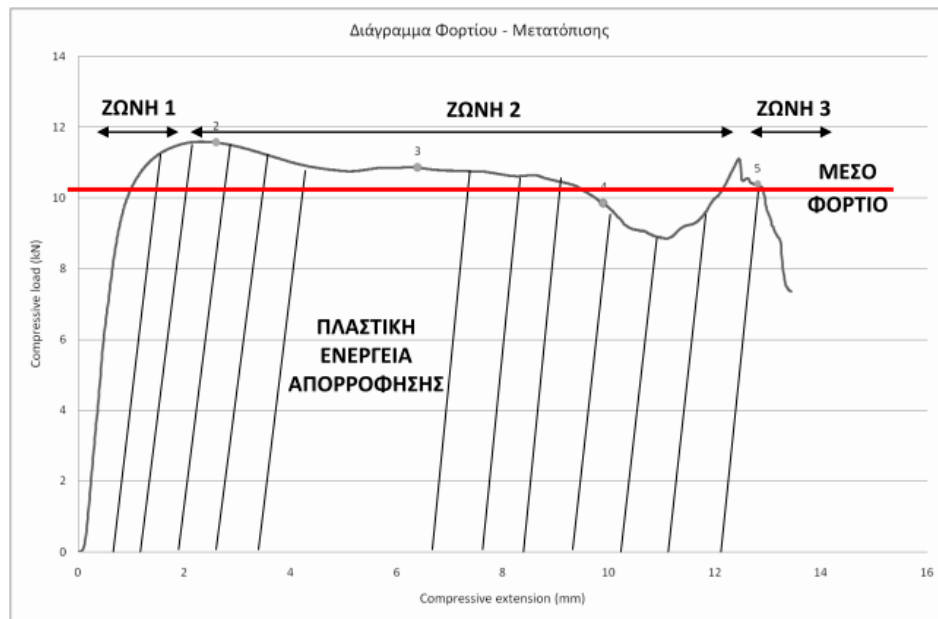
Είναι σαφές πως οι πλαστικοί αρμοί σχηματίζονται στις ζώνες I και II (περιοχή γύρω από τον κατακόρυφο οριζόντιο άξονα συμμετρίας αντίστοιχα). Οι ευθείες B_1B_3 και A_1A_3 κινούνται πάνω στους άξονες y και x αντίστοιχα κατά τη διάρκεια της πλευρικής συμπίεσης. Άρα οι συντεταγμένες των σημείων αυτών αλλάζουν συνεχώς. Επίσης σε αυτά τα σημεία δεν εμφανίζεται καθόλου διατμητική τάση. Μετά από ένα σημείο της συμπίεσης η ζώνη I μπαίνει στην πλαστική περιοχή και ακολουθεί η ζώνη II. Ο κυλινδρικός σωλήνας γίνεται σταδιακά επίπεδος λόγω του σχηματισμού τεσσάρων πλαστικών αρμών στους άξονες συμμετρίας.



Εικόνα 4.9: Εμφάνιση πλαστικών αρμών σε σωλήνα κυκλικής διατομής.

4.5. Διάγραμμα Φορτίου- Μετατόπισης

Σε κάθε διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης η καμπύλη που απεικονίζεται από τη σειρά των δεδομένων, δημιουργεί τρεις διακριτές περιοχές/ζώνες σε αυτό. Η πρώτη ελαστική περιοχή φαίνεται από την αρχή της θλίψης μέχρι ένα αρχικό πρώτο μέγιστο του φορτίου το οποίο δημιουργείται λόγω της επαφής του εμβόλου με το δοκίμιο και της δημιουργίας πλαστικής- μόνιμης παραμόρφωσης του. Διακόπτεται από μια μεγάλης κλίσης πτώση της καμπύλης του φορτίου.



Εικόνα 4.10: Διάγραμμα Φορτίου- Μετατόπισης.

Η δεύτερη πλαστική περιοχή της καμπύλης βρίσκεται μετά το πρώτο αυτό αρχικό μέγιστο και συνήθως, ανάλογα με την μορφή των δοκιμίων, του τύπου της καταπόνησης (αξονική, πλευρική, αναστροφή, απότμηση) αλλά και του είδους του υλικού, ακολουθεί μια σχεδόν σταθερή τιμή με μικρές μη ομοιόμορφες διακυμάνσεις και είναι αυτό που φαίνεται στο μεγαλύτερο μήκος της μετατόπισης και ονομάζεται πλατό του διαγράμματος.

Η τρίτη περιοχή θραύσης του διαγράμματος οριοθετείται από το τέλος του πλατό και παρουσιάζει μια ασταθή περιοχή με μικρές αυξομειώσεις που σχετίζονται με την μεγάλη μείωση του κατακόρυφου ύψους του σωλήνα και την περαιτέρω συρρίκνωση των πλευρικών αρθρώσεων.

4.6. Δείκτες ενεργειακής απορρόφησης

Όπως επισημάνθηκε προηγουμένως, το crashworthiness μελετά την ικανότητα απορρόφησης της κινητικής ενέργειας κατά την κρούση και μετατροπής της σε πλαστικό έργο από τους ενεργειακούς απορροφητές. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητο να περιγραφούν οι τρόποι με τους οποίους μετράται η απορρόφηση ενέργειας από τις συγκεκριμένες διατάξεις.

Το βασικότερο εργαλείο, από το οποίο προκύπτουν όλοι οι δείκτες ενεργειακής απορρόφησης, είναι η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Μετρώντας ταυτόχρονα το φορτίο που ασκεί το έμβολο στο δοκίμιο και τη μετατόπισή του, προκύπτουν τα σημεία τα οποία σχηματίζουν την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Προφανώς, το φορτίο που ασκεί το έμβολο στο δοκίμιο, είναι και η δύναμη που δέχεται το δοκίμιο (Νόμος Newton δράσης-αντίδρασης) και η μετατόπιση του εμβόλου αποτελεί αντίστοιχα τη βράχυνση του δοκιμίου. Συνεπώς, η καμπύλη φορτίου/μετατόπισης του εμβόλου αποτελεί ταυτόχρονα και καμπύλη φορτίου/βράχυνσης του δοκιμίου.

Ένα από τα μεγέθη που προκύπτουν από την καμπύλη και είναι ενδεικτικό για τη μελέτη της ενεργειακής απορρόφησης, είναι το μέγιστο φορτίο P_{max} . Στις περισσότερες περιπτώσεις κατάρρευσης το αρχικό τοπικό μέγιστο αποτελεί και το ολικό μέγιστο στην καμπύλη. Για το λόγο αυτό, το αρχικό μέγιστο (peak) φορτίο, αποτελεί ένδειξη του τρόπου απορρόφησης ενέργειας και του ποσού που μπορεί να παραλάβει το δοκίμιο.

Ένα εξίσου σημαντικό μέγεθος που προκύπτει από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης, είναι το μέσο φορτίο P_{mean} . Το μέσο φορτίο είναι ένα θεωρητικό μέγεθος, που μας επιτρέπει να έχουμε μια εικόνα για το πόσο φορτίο κατά μέσο όρο μπορεί να παραλάβει το δοκίμιο κατά την κατάρρευση.

Το σημαντικότερο μέγεθος που προκύπτει από την καμπύλη είναι το πλαστικό έργο. Έτσι, υπολογίζοντας το εμβαδό του χωρίου που εμπεριέχεται κάτω από την καμπύλη φορτίου/μετατόπισης, υπολογίζουμε την απορροφούμενη ενέργεια, δηλαδή το πλαστικό έργο W .

Ο πιο εύκολος τρόπος υπολογισμού του W είναι με το μέσο φορτίο και τη μετατόπιση. Έτσι με χρήση της σχέσης $W = P_m \times l$, όπου l : βράχυνση δοκιμίου, υπολογίζουμε την ενέργεια που απορροφάται από το δοκίμιο.

Μελετώντας την κατάρρευση των ενεργειακών απορροφητών, μας ενδιαφέρει να επιτυγχάνουμε ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου. Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου, που εμφανίζεται στη βιβλιογραφία ως Crush Force Efficiency, ορίζεται ως ο λόγος του αρχικού μέγιστου φορτίου προς το μέσο φορτίο (c.f.e. = initial peak load/mean load) και είναι αδιάστατο μέγεθος ή μετράται σε επί τις εκατό ποσοστό %.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, θέλουμε να έχουμε όσο το δυνατό μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου, συνεπώς επιδιώκουμε ο λόγος αυτός να είναι κοντά στη μονάδα. Εξασφαλίζοντας ομοιομορφία στην κατανομή φορτίου, προσπαθούμε να επιτύχουμε προοδευτική κατάρρευση του δοκιμίου, κάτι που είναι πολύ σημαντικό στην απορρόφηση κρουστικών φορτίων.

5. Πειραματική διαδικασία

5.1. Γενικά

Τα πειραματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση με τα αντίστοιχα αριθμητικά, προήλθαν από τη διπλωματική εργασία του Ιωάννη Τσερώνη με θέμα: «Σχεδιασμός διάταξης απορρόφησης ενέργειας με απαραμόρφωτα παρεμβλήματα σε συνθήκες πρόσκρουσης».

5.2. Περιγραφή της πειραματικής διάταξης

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τη Universal μηχανή δοκιμών, έναν Η/Υ και το λογισμικό της εταιρίας Bluehill που είναι απαραίτητο για την επεξεργασία των δεδομένων. Η Universal μηχανή είναι της εταιρίας Instron και έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί δοκιμές εφελκυσμού, κάμψης και θλίψης τοποθετώντας τα κατάλληλα εργαλεία.

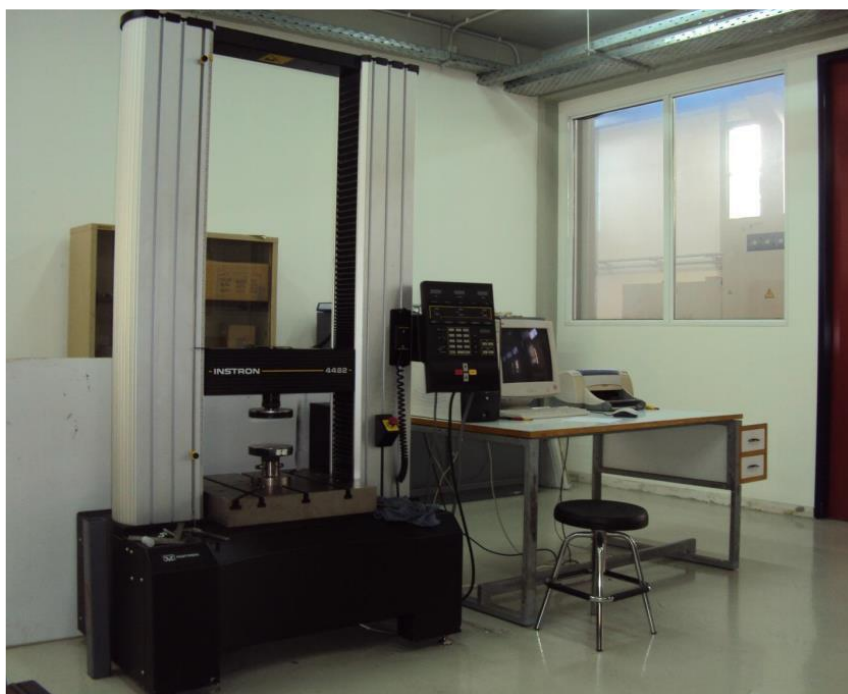
Τεχνικά χαρακτηριστικά της INSTRON 4482:

-Ονομαστικό φορτίο: 10kN

-Μέγιστη ταχύτητα κεφαλής: 500 mm/min

-Μέγιστο φορτίο στη μέγιστη ταχύτητα: 75kN

-Μέγιστη ταχύτητα κεφαλής στο μέγιστο φορτίο: 250 mm/min.

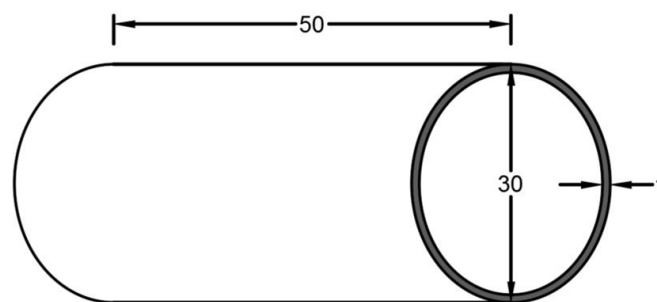


Εικόνα 5.1: Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.

5.3. Δοκίμια

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα ήταν από κράμα αλουμινίου. Η μέθοδος κατασκευής των δοκιμίων έγινε με κοπή κυλινδρικών σωλήνων ώστε να πάρουμε κάθε φορά την επιθυμητή διάσταση.

Συνολικά κατασκευάστηκαν 84 δοκίμια μήκους $L=50\text{mm}$ και εξωτερικής διαμέτρου $D_{\text{εξ}}=30\text{mm}$. Από αυτά, τα 42 με πάχος υλικού $1,0\text{mm}$ και 42 με πάχος υλικού $1,5\text{mm}$. Κάθε ένα από τα παραπάνω δοκίμια μετά την κοπή του, υποβλήθηκε σε κατεργασία λείανσης στις ακμές του, εσωτερικά και εξωτερικά, έτσι ώστε πιθανές δυνάμεις από τριβή να είναι το δυνατόν οι ελάχιστες.



Εικόνα 5.2: Σκαρίφημα του δοκιμίου που χρησιμοποιήθηκε.

5.4. Απαραμόρφωτα παρεμβλήματα

Τα απαραμόρφωτα παρεμβλήματα που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα, κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο. Το υλικό τους είναι μασίφ χάλυβας και απαιτήθηκαν για τις ανάγκες των διαφορετικών διατάξεων των πειραμάτων, παρεμβλήματα σε τέσσερις διαφορετικές διαμέτρους, ενώ το μήκος σε όλα ήταν σταθερό και ίσο με $L=60\text{mm}$. Οι τέσσερις διαφορετικές διαμέτροι ήταν:

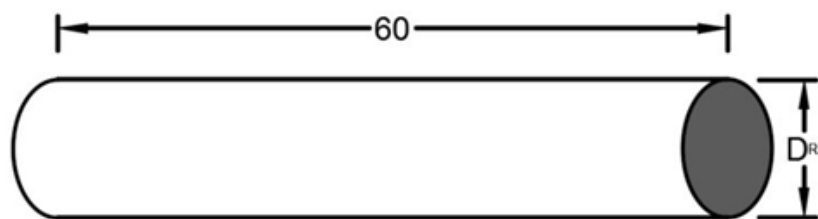
- $D_{R1}=12,40\text{mm}$

- $D_{R2}=7,50\text{mm}$

- $D_{R3}=5,10\text{mm}$

- $D_{R4}=4,60\text{mm}$

Το μήκος των παρεμβλημάτων επιλέχθηκε σκόπιμα μεγαλύτερο από εκείνο των δοκιμίων, έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι η κατανομή του φορτίου από την πρέσα θα ήταν όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη και δεν θα υπήρχαν διαρροές πειραματικού υλικού εκτός των ορίων της διάταξης.



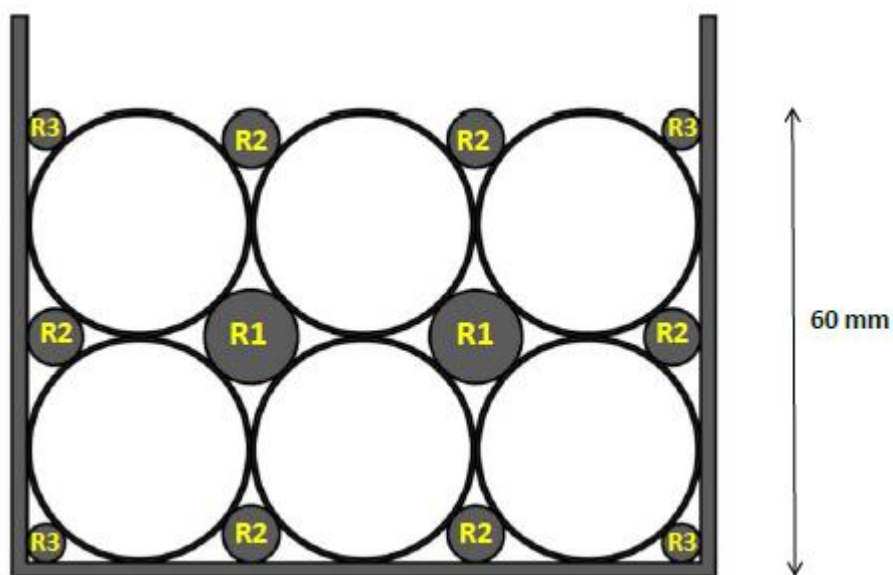
Εικόνα 5.3: Σκαρίφημα των παρεμβλημάτων που χρησιμοποιήθηκαν.

5.5. Διατάξεις πειραματικών διαδικασιών και τρόπος διεξαγωγής πειραμάτων

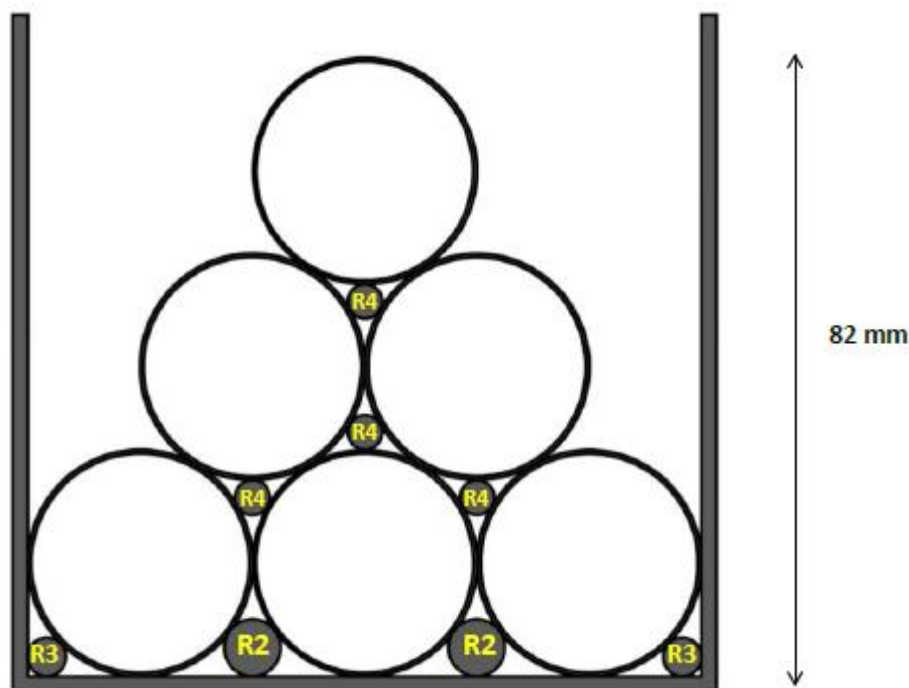
Οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δύο διαφορετικών σχηματισμών διατάξεις. Της ορθογωνικής και της τριγωνικής.

Στην περίπτωση της ορθογωνικής διάταξης το ύψος της ήταν 60mm, με διαδρομή εμβόλου 30mm.

Στην περίπτωση της τριγωνικής διάταξης το ύψος της ήταν 82mm, με διαδρομή εμβόλου 52mm.



Εικόνα 5.4: Ορθογωνική διάταξη των πειραμάτων με τα παρεμβλήματα.



Εικόνα 5.5: Τριγωνική διάταξη των πειραμάτων με τα παρεμβλήματα.

Και στις δύο μορφές διατάξεων, η ταχύτητα με την οποία το έμβολο πραγματοποιούσε την διαδρομή ήταν 10mm/min, ταχύτητα η οποία είναι πάρα πολύ καλή όσον αφορά την προσέγγιση στατικών συνθηκών.

Τα πειράματα διεξήχθησαν με τους εξής τρόπους και σειρά. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα των ορθογωνικών διατάξεων των ενός και των ενάμιση χιλιοστών, χωρίς αλλά και με την χρήση των παραμόρφωτων παρεμβλημάτων. Δευτερευόντως, έλαβαν χώρα τα πειράματα των τριγωνικών διατάξεων με τον ίδιο τρόπο. Πρώτα τα δοκίμια πάχους ενός χιλιοστού, χωρίς και με τα παρεμβλήματα και κατόπιν αυτά των ενάμιση με τον ίδιο τρόπο.

Αφού παρατηρήθηκαν οι τελικές μορφές των δοκιμίων από τα οχτώ πρώτα πειράματα και ταυτόχρονα αξιολογήθηκαν τα δεδομένα που παρείχε μέσω του H/Y η πρέσα, αποφασίστηκε η διεξαγωγή περαιτέρω πειραμάτων, διατάξεων μικτού πάχους -t- δοκιμίων και με την παρουσία ή μη των παραμόρφωτων παρεμβλημάτων.

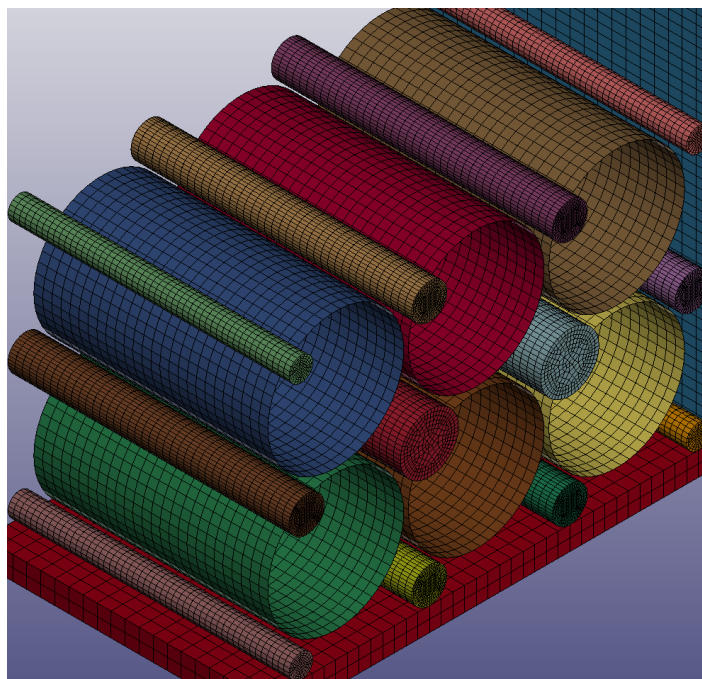
6. Αριθμητική προσομοίωση

6.1. Γενικά

Η αριθμητική προσομοίωση χωρίζεται σε δύο μέρη, το ένα αφορά τη μοντελοποίηση της πειραματικής διαδικασίας και το άλλο την παραμετρική ανάλυση. Η διαδικασία και στις δύο περιπτώσεις πραγματοποιήθηκε κάνοντας χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Ls-Dyna της εταιρίας Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Το πακέτο αυτό αποτελείται από τρεις συνιστώσες, τον pre-processor, τον solver και τον post-processor. Στον pre-processor σχεδιάστηκαν τα μοντέλα (CAD), δημιουργήθηκε το πλέγμα και ορίστηκαν παράμετροι όπως, η ταχύτητα του εμβόλου, το υλικό των δοκιμίων, οι οριακές συνθήκες κτλ. Στον solver έγινε η επίλυση του προβλήματος και τέλος, στον post-processor πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

6.2. Περιγραφή μοντέλων και ιδιοτήτων τους

Η μοντελοποίηση της πειραματικής διάταξης, έγινε με την ακριβώς ίδια γεωμετρία στο LS-Dyna PrePost.



Εικόνα 6.1: Μοντελοποίηση της πειραματικής διάταξης στο LS-Dyna.

Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ως εξής:

-Για τα απαραμόρφωτα παρεμβλήματα καθώς και τις πλάκες/έμβολο χρησιμοποιήθηκε το υλικό 020-RIGID.

Οι ιδιότητες που εισήχθησαν ήταν:

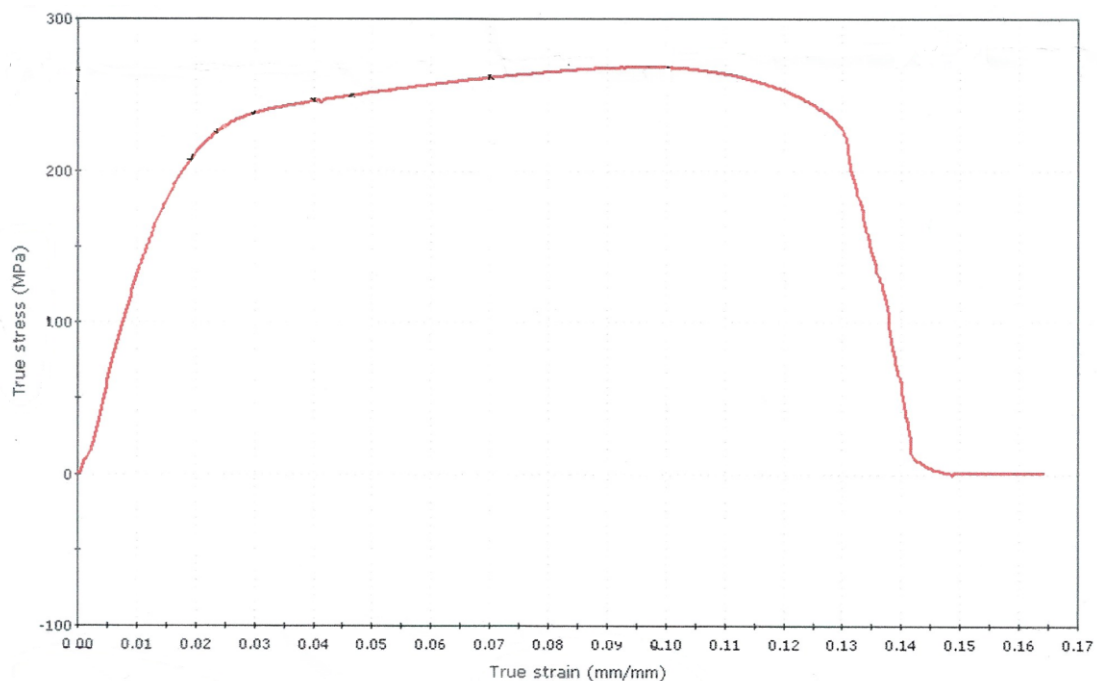
- Πυκνότητα: $\rho = 0,00783 \text{ gr/mm}^3$
- Young's modulus: $E = 2,07 \times 10^5 \text{ MPa}$
- Λόγος Poisson: $\nu = 0,30$

-Για τα παραμορφώσιμα δοκίμια χρησιμοποιήθηκε το υλικό 024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY.

Οι ιδιότητες αντίστοιχα ήταν:

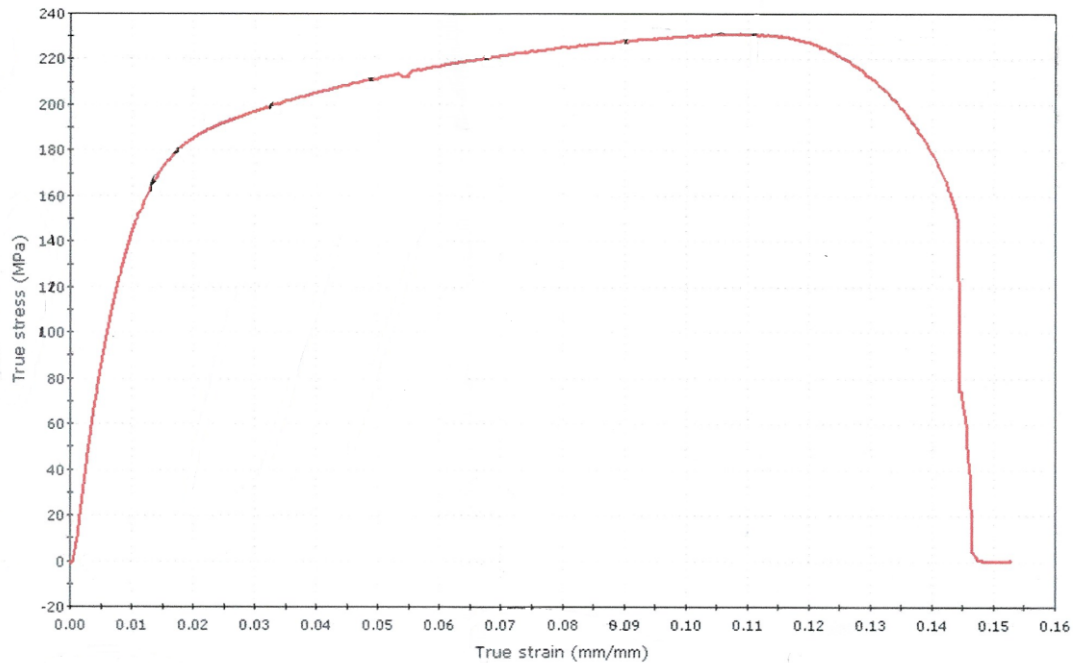
- Πυκνότητα: $\rho = 0,0027 \text{ gr/mm}^3$
- Young's modulus: $E = 6,9 \times 10^4 \text{ MPa}$
- Λόγος Poisson: $\nu = 0,33$
- Η διακριτοποίηση για τα δοκίμια ήταν 26 στοιχεία κατά μήκος και 50 στοιχεία στη περιφέρεια

Επίσης για τα δύο διαφορετικά πάχη, χρησιμοποιήθηκε διαφορετική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης η οποία παρουσιάζεται παρακάτω για το καθένα:



Thickness=1.5 mm

Εικόνα 6.2: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για πάχος $t=1,5 \text{ mm}$.



Thickness=1.0 mm

Εικόνα 6.3: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για πάχος $t=1,0\text{mm}$.

Οι συντελεστές τριβής ορίστηκαν:

- Στατικός: $FS=0,2$
- Δυναμικός: $FD=0,15$

Όσο αφορά τις συνοριακές συνθήκες και την αλληλεπίδραση των δοκιμίων/παρεμβλημάτων/πλακών, χρησιμοποιήθηκαν οι εξής συνθήκες:

- CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE για την επαφή των δοκιμίων μεταξύ τους.
- CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE για την επαφή του εμβόλου και των πλακών με τα δοκίμια.

Η ταχύτητα του εμβόλου στη πειραματική διαδικασία ήταν της τάξης των 10mm/min . Στην αριθμητική προσομοίωση η ταχύτητα ορίστηκε στο 1mm/ms . Προκειμένου να γίνει αυτό, έπρεπε να εξεταστεί εάν έχουμε οιονεί στατική φόρτιση (Quasi-static loading) προκειμένου να έχουμε αποφυγή εισαγωγής αδρανειακών και δυναμικών επιπτώσεων, λόγω της αυξημένης ταχύτητας του εμβόλου.

Για να γίνει αυτό ελέγχουμε εάν η κινητική ενέργεια του συστήματος είναι μικρότερη από το 10% της εσωτερικής ενέργειας. Παίρνοντας ως δείγμα μια τυχαία αριθμητική προσομοίωση έχουμε: $E_{\text{κιν}}/E_{\text{εσωτ}}=335,25\text{J}/204408\text{J}=0,16\%$.

Άρα ισχύει η υπόθεση μας και στη συγκεκριμένη αλλά και στις υπόλοιπες προσομοιώσεις.

6.3. Παρουσίαση αριθμητικών προσομοιώσεων και σύγκριση με πειραματικές διατάξεις

Για την εύκολη κατανόηση αλλά και εύρεση των προσομοιώσεων, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη ονοματολογία.

Αρχικά μπαίνει αύξον αριθμός.

Ύστερα για ορθογωνική διάταξη χρησιμοποιείται ο όρος rect (rectangular) στο αντίστοιχο όνομα, για τριγωνική ο όρος tri (triangle) ενώ για τη παραμετρική ανάλυση ο όρος par (parametric).

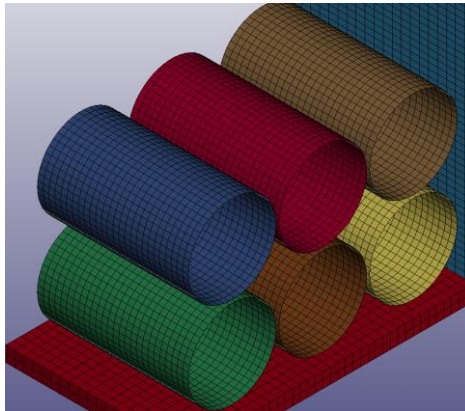
Ανάλογα το πάχος ,προστίθεται το 10 ή το 15 (10 για 1,0mm πάχος και 15 για 1,5mm πάχος).

Τέλος, διατάξεις με παρεμβλήματα, έχουν τον όρο wi (with), ενώ χωρίς παρεμβλήματα τον όρο wo (without).

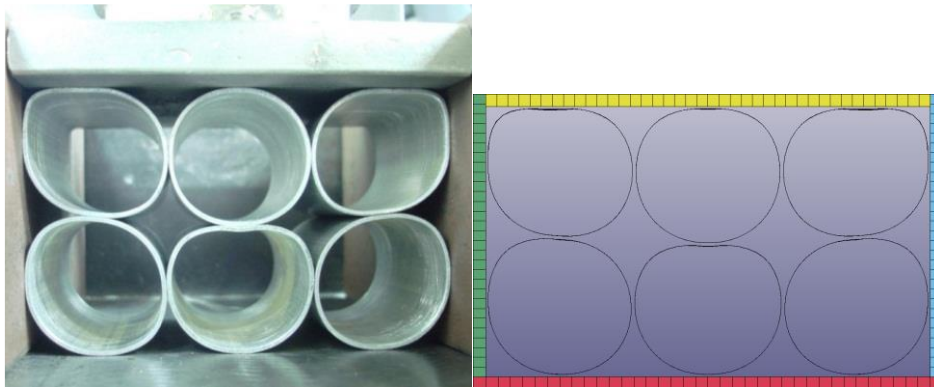
Παράδειγμα για ορθογωνική διάταξη πάχους 1,0mm χωρίς παρεμβλήματα: 1.rect-10-wo.

6.3.1.rect-10-wo (Ορθογωνική διάταξη πάχους 1,0mm χωρίς παρεμβλήματα)

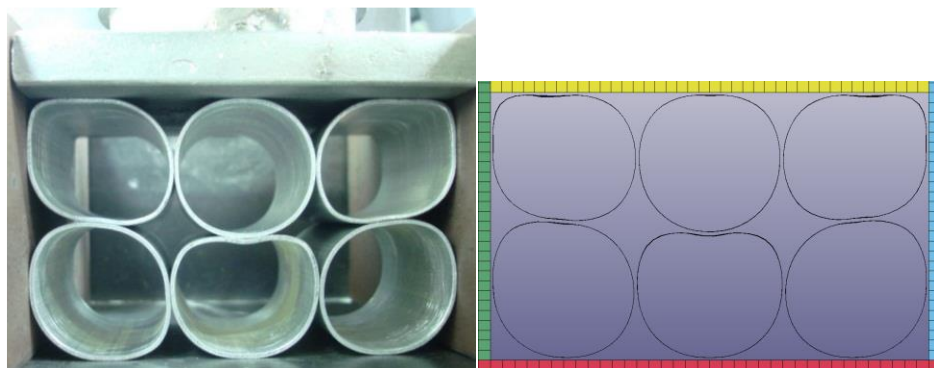
Iso όψη της προσομοίωσης:



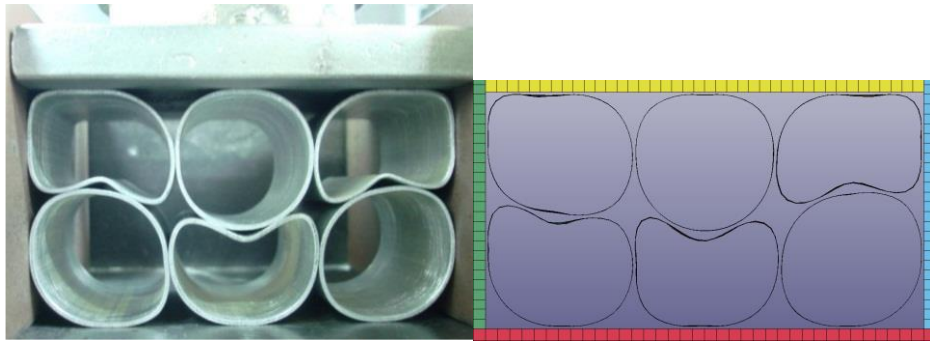
Θέση 1(4,7mm):



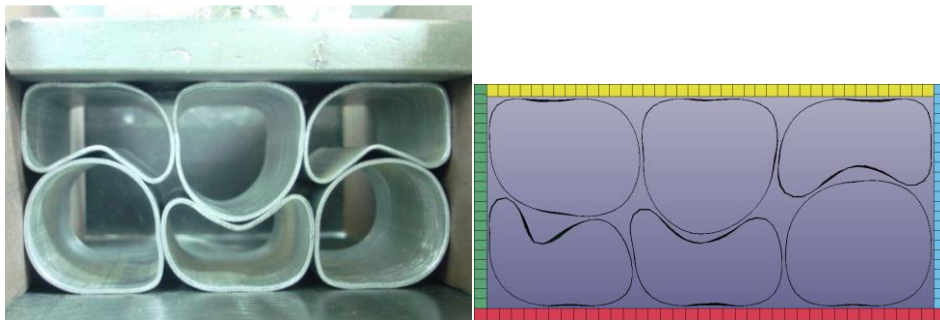
Θέση 2(6,1mm):



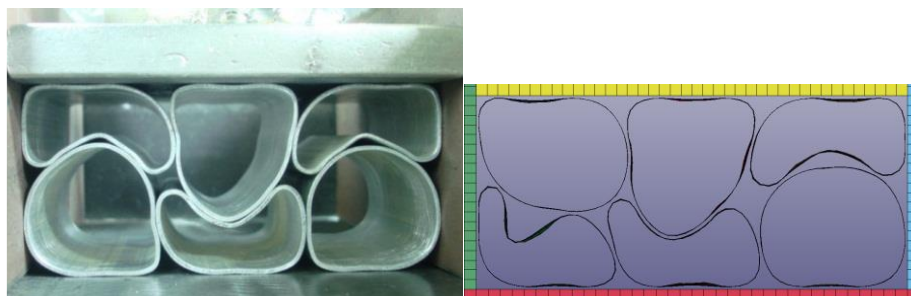
Θέση 3(11,4mm):



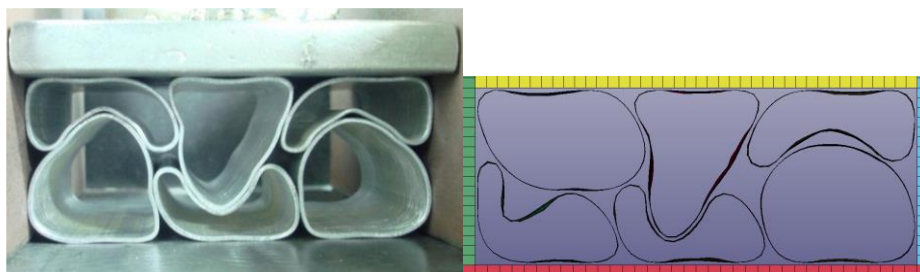
Θέση 4(16,5mm):



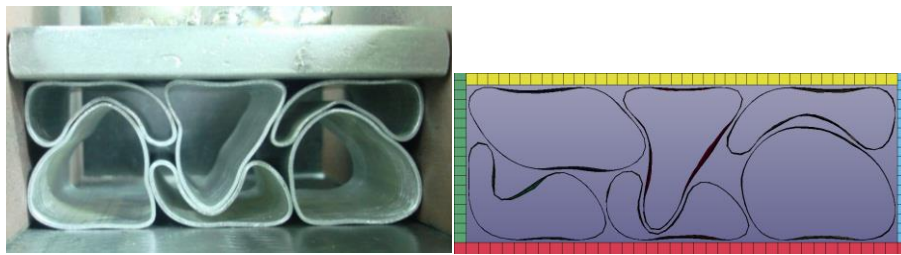
Θέση 5(19,7mm):



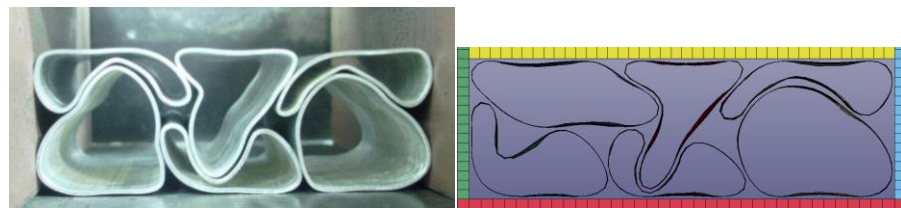
Θέση 6(24,1mm):



Θέση 7(27,1mm):



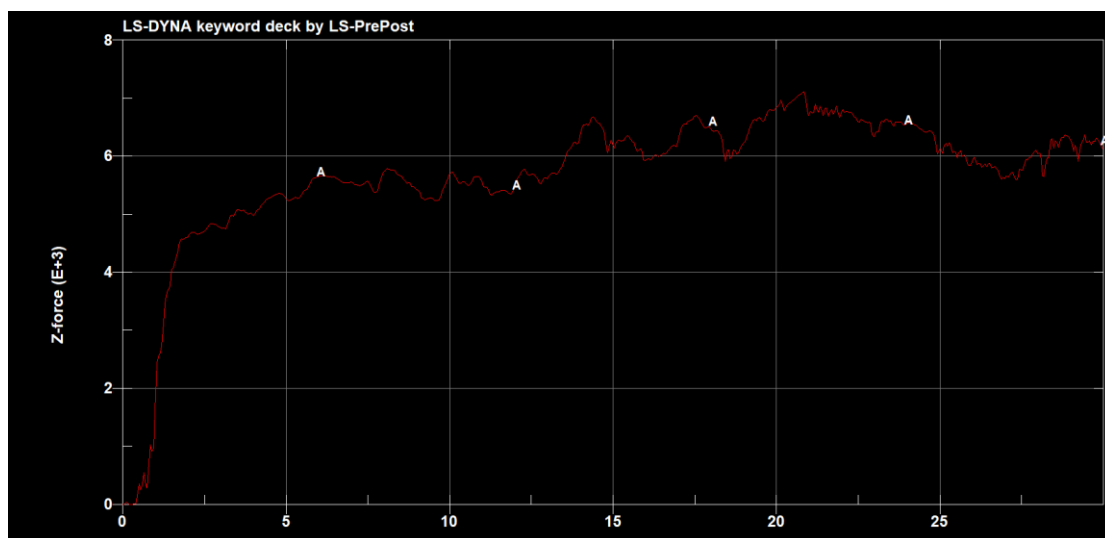
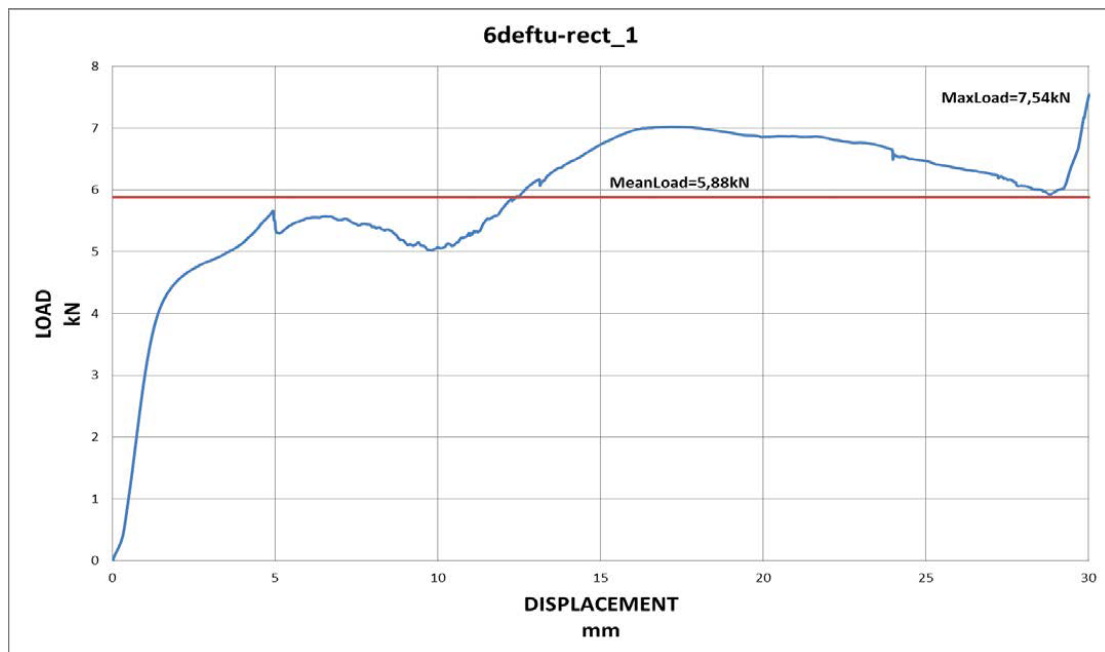
Θέση 8(30mm):



Πίνακας δεδομένων και σύγκρισης:

	$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\max}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
Πειράματος	30	5,88	7,55	0,77	176,4
Μοντέλου	30	5,69	7,09	0,80	170,7

Σύγκριση διαγραμμάτων Φορτίου-Μετατόπισης:



Σχόλια και σύγκριση πειράματος και προσομοίωσης:

Στα 4,7mm διαδρομής του εμβόλου παρατηρούμε ότι το υλικό έχει υποχωρήσει ομαλά και ομοιόμορφα, περισσότερο εμφανώς στα επάνω δοκίμια και λιγότερο στα κάτω. Υπάρχει δημιουργία αρθρώσεων οι οποίες είναι και υπεύθυνες για την αύξηση απορρόφησης της ενέργειας του φορτίου.

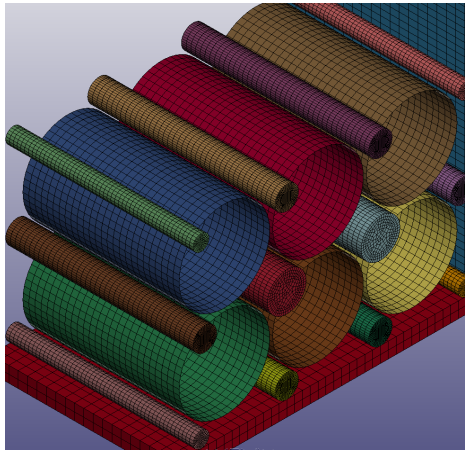
Από τα 11,4mm έως τα 16,5mm δημιουργούνται αρθρώσεις και στην κάτω σειρά της διάταξης προκαλώντας έτσι και δεύτερη μεγάλη ένδειξη αύξησης φορτίου. Μέχρι τα 27mm περίπου το διάγραμμα ακολουθεί ένα σχετικά σταθερό μέγεθος φορτίου. Η τελική απότομη αύξηση σε αυτό οφείλεται κυρίως στην επαφή απέναντι εσωτερικών πλευρών των δοκιμίων λόγω περιορισμού του χώρου, ενώ στο αντίστοιχο μοντέλο δεν υπάρχει.

Τα P_{mean} και P_{max} του πειράματος και ης προσομοίωσης είναι αρκετά κοντά και κατά συνέπεια το CFE όπως και η ενέργεια απορρόφησης, η οποία είναι αρκετά χαμηλή όμως.

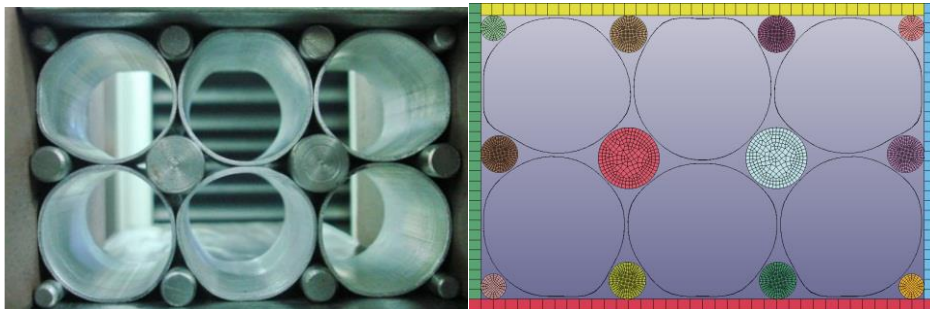
Η υψηλότερη ενέργεια απορρόφησης στο πείραμα οφείλεται στη τελική απότομη αύξηση του φορτίου. Τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης είναι πανομοιότυπα και στις δύο περιπτώσεις.

6.3.2.rect-10-wi (Ορθογωνική διάταξη πάχους 1,0mm με παρεμβλήματα)

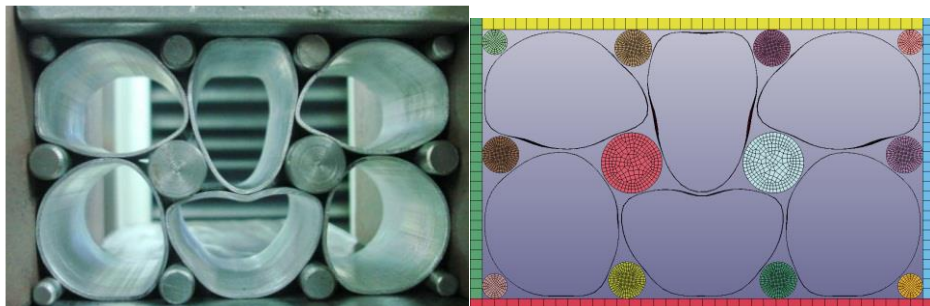
Iso όψη της προσομοίωσης:



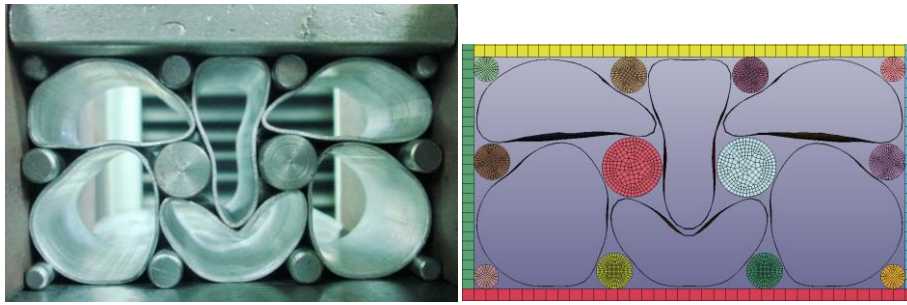
Θέση 1(2,5mm):



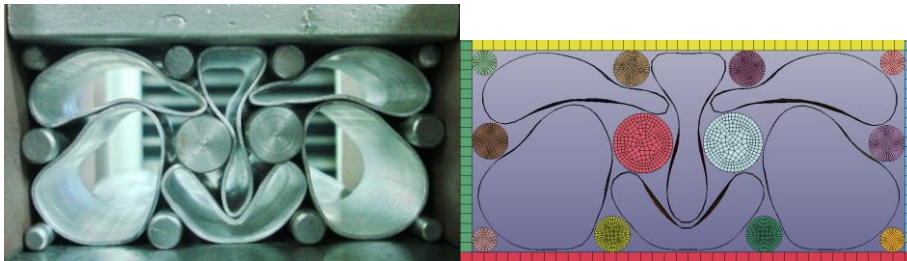
Θέση 2(5,0mm):



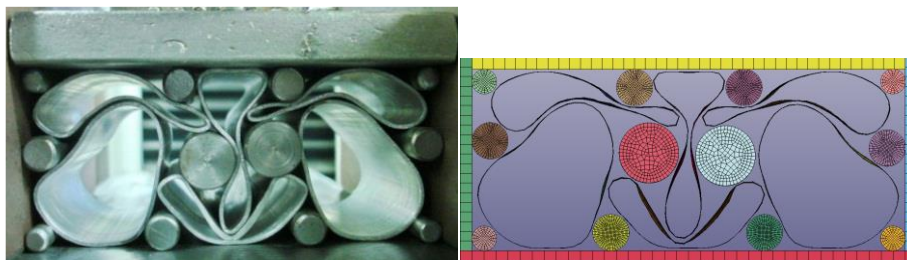
Θέση 3(11,4mm):



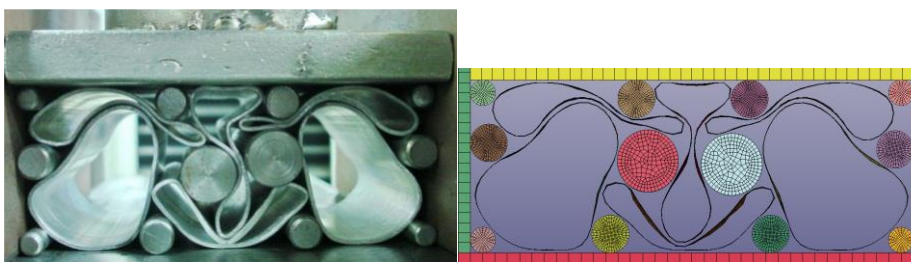
Θέση 4(17,9mm):



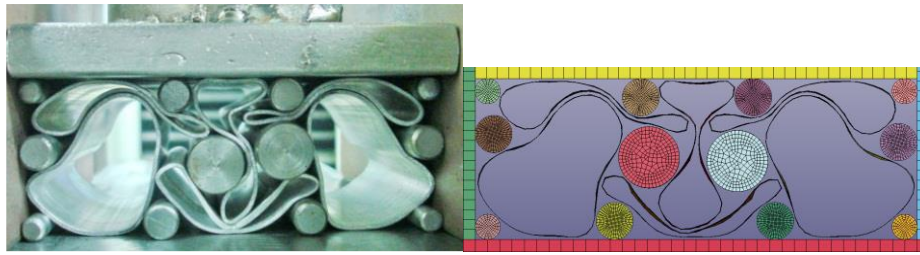
Θέση 5(22,6mm):



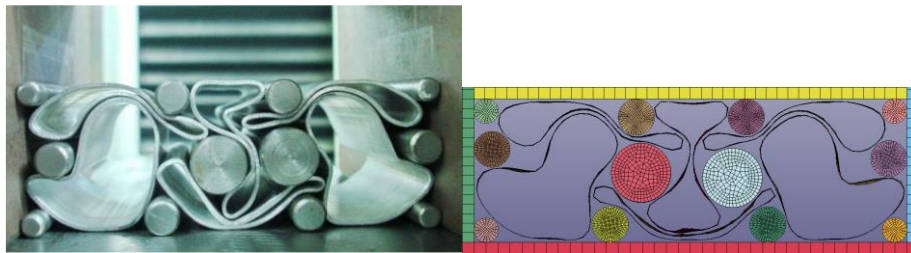
Θέση 6(25,6mm):



Θέση 7(27,5mm):



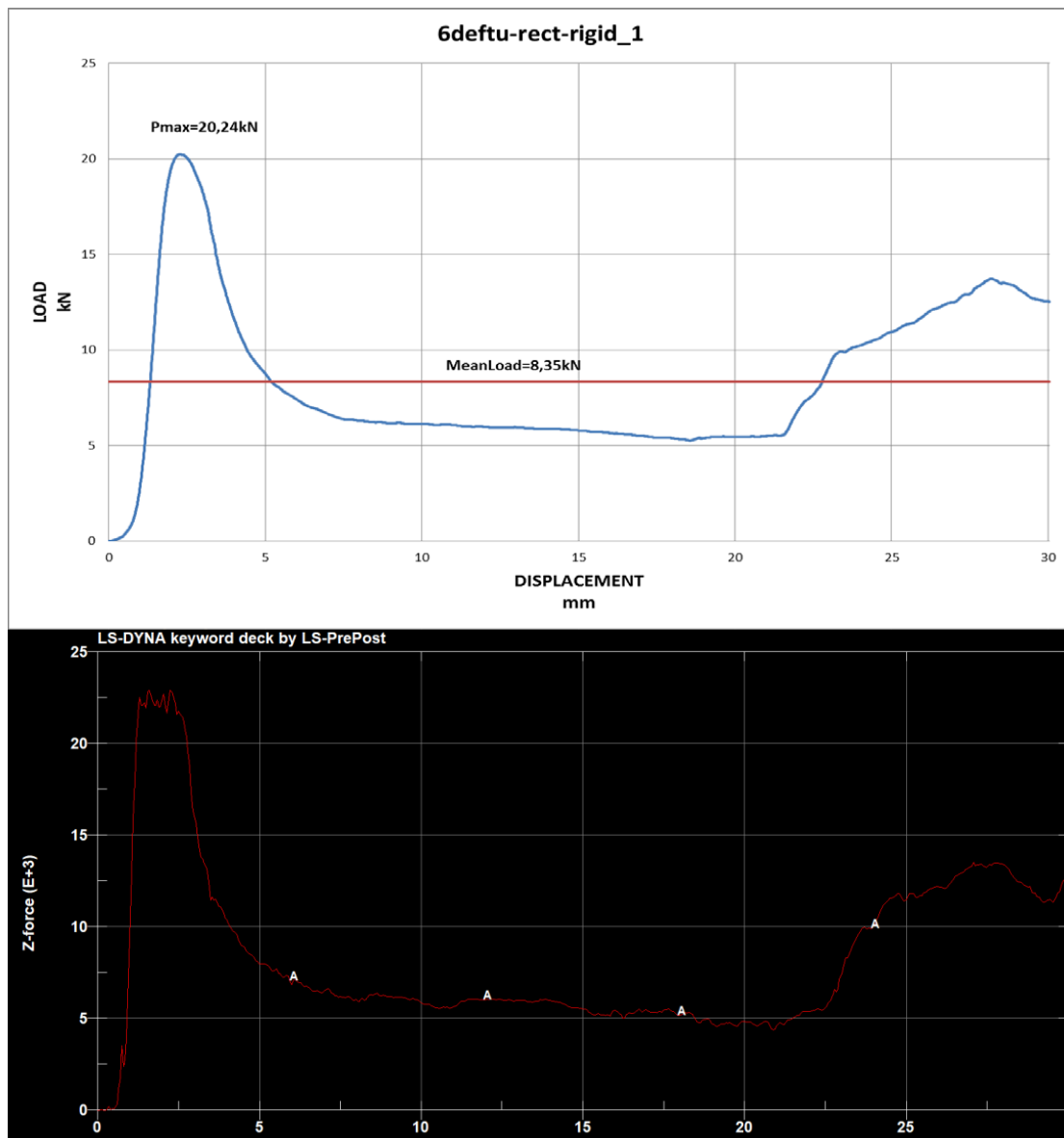
Θέση 8(30mm):



Πίνακας δεδομένων και σύγκρισης:

	$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\max}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
Πειράματος	30	8,35	20,24	0,41	250,5
Μοντέλου	30	8,38	23,41	0,36	251,5

Σύγκριση διαγραμμάτων Φορτίου -Μετατόπισης:



Σχόλια και σύγκριση πειράματος και προσομοίωσης:

Η παρουσία των άκαμπτων παρεμβλημάτων έχει επιταχύνει την δημιουργία των αρθρώσεων στα δοκίμια για αυτό και παρατηρείται η πολύ απότομη αρχική αύξηση του φορτίου στα 2,5mm. Μετά την επαναφορά της δύναμης σε περιοχή λίγο κάτω από το μέσο φορτίο κοντά στα 5mm διαδρομής, αυτή παραμένει σχετικά σταθερή έως και τα 22,6mm.

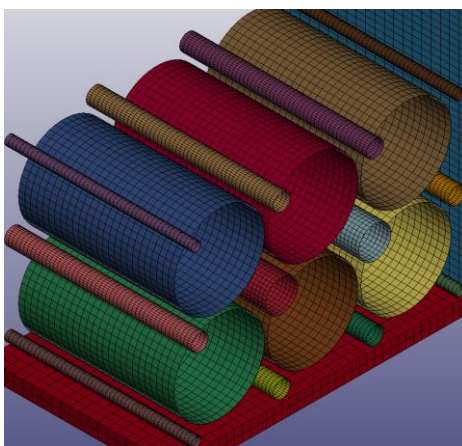
Στο κάτω μεσαίο δοκίμιο φαίνεται η δημιουργία μικρής ρωγμής η οποία όμως δεν καταλήγει σε κατάρρευση εξαιτίας του μικρού πάχους του δοκιμίου. Η τελική αύξηση οφείλεται στον περιορισμό του χώρου και στη επαφή μεταξύ των δοκιμίων.

Τα τελικά δοκίμια είναι ομοιόμορφα παραμορφωμένα. Και στο πείραμα αλλά και στη προσομοίωση οι τιμές όλων των παραμέτρων είναι κοντά, ενώ και τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης έχουν την ίδια μορφή, όπως και η παραμόρφωση των δοκιμίων.

Συμπληρωματική προσομοίωση:

Προκειμένου να εξετάσουμε την επίδραση των αδρανειακών δυνάμεων από τα παρεμβλήματα, το συγκεκριμένο μοντέλο κατασκευάστηκε με κοίλα παρεμβλήματα προκειμένου να δούμε τις διαφορές στα δεδομένα.

Iso όψη με κοίλα παρεμβλήματα:



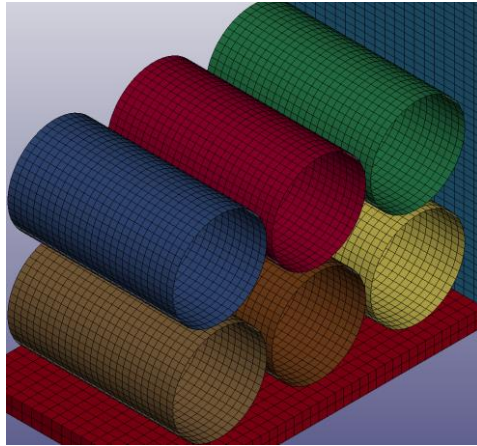
Πίνακας δεδομένων και σύγκρισης:

	$S_{max}(mm)$	$P_{mean}(kN)$	$P_{max}(kN)$	CFE	$E_{abs}(J)$
Πειράματος	30	8,35	20,24	0,41	250,5
Μοντέλου	30	8,38	23,41	0,36	251,5
Μοντέλο με κοίλα	30	8.24	20.20	0.41	247.1

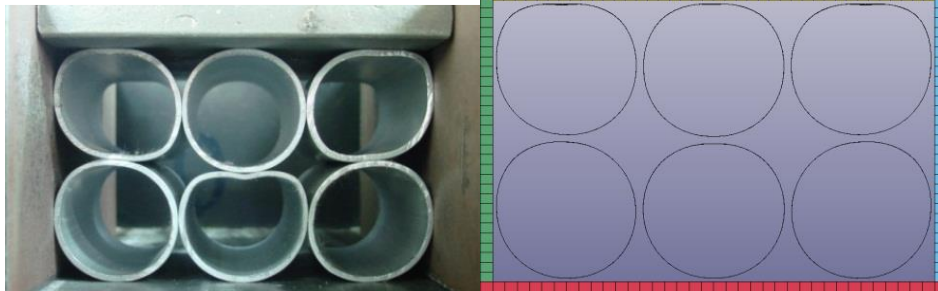
Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στα δεδομένα, οπότε οι υπόλοιπες προσομοιώσεις θα διεξαχθούν με τη χρήση κανονικών παρεμβλημάτων.

6.3.3.rect-15-wo (Ορθογωνική διάταξη πάχους 1,5mm χωρίς παρεμβλήματα)

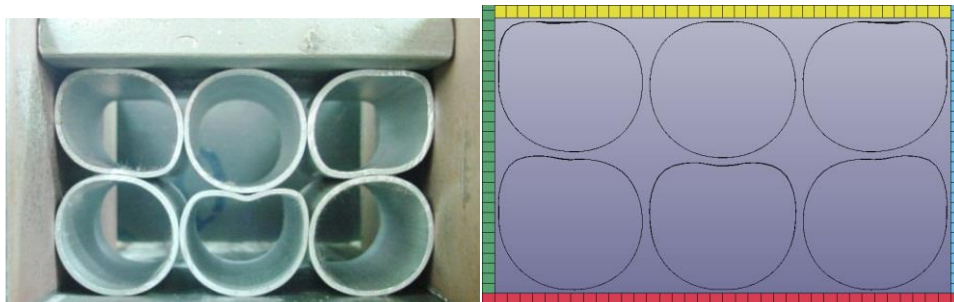
Iso όψη της προσομοίωσης:



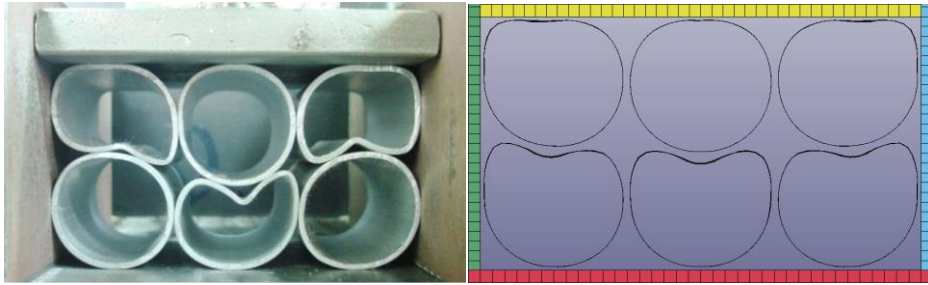
Θέση 1(2,6mm):



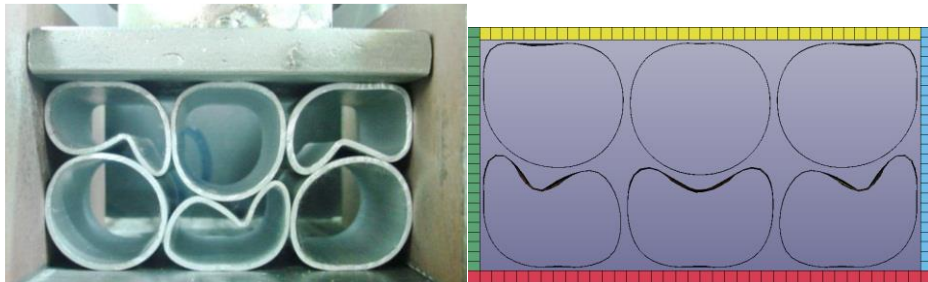
Θέση 2(5,4mm):



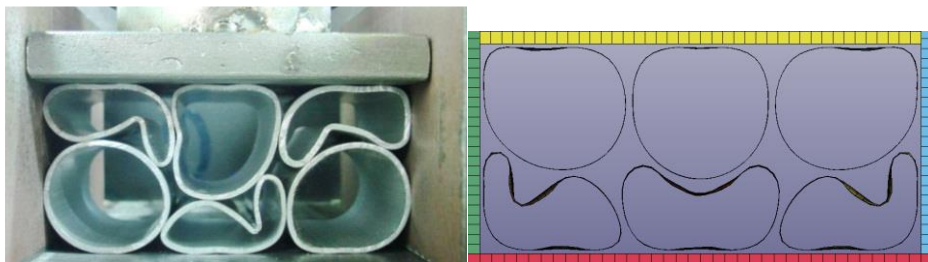
Θέση 3(8,0mm):



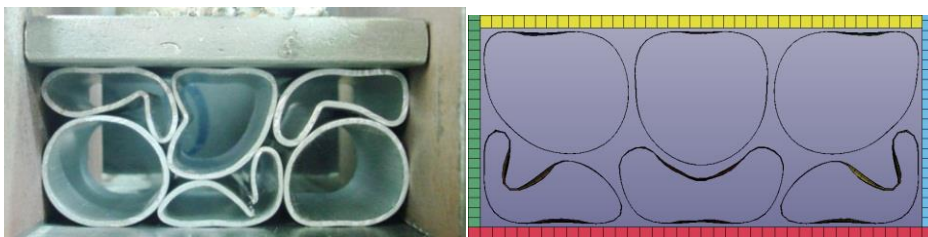
Θέση 4(12,4mm):



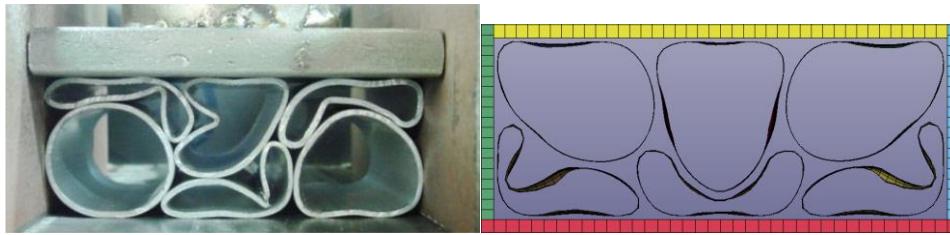
Θέση 5(17,1mm):



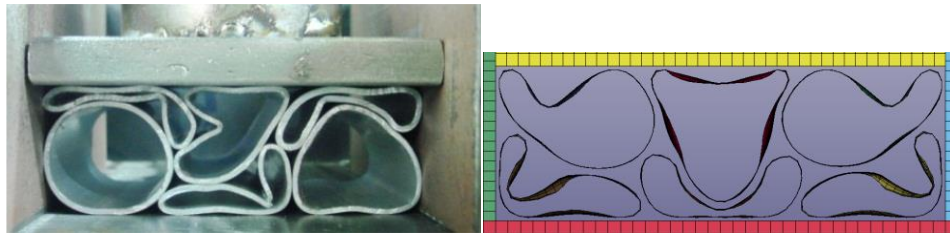
Θέση 6(19,4mm):



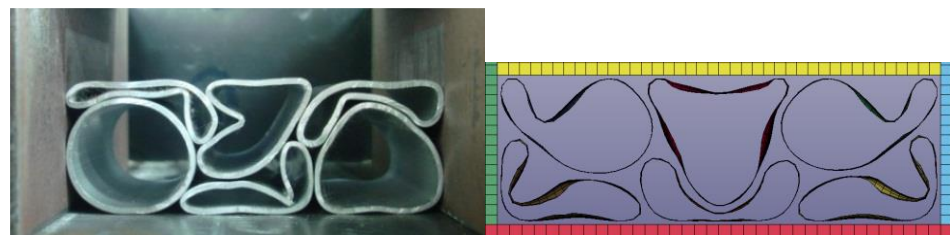
Θέση 7(24,5mm):



Θέση 8(28,9mm):



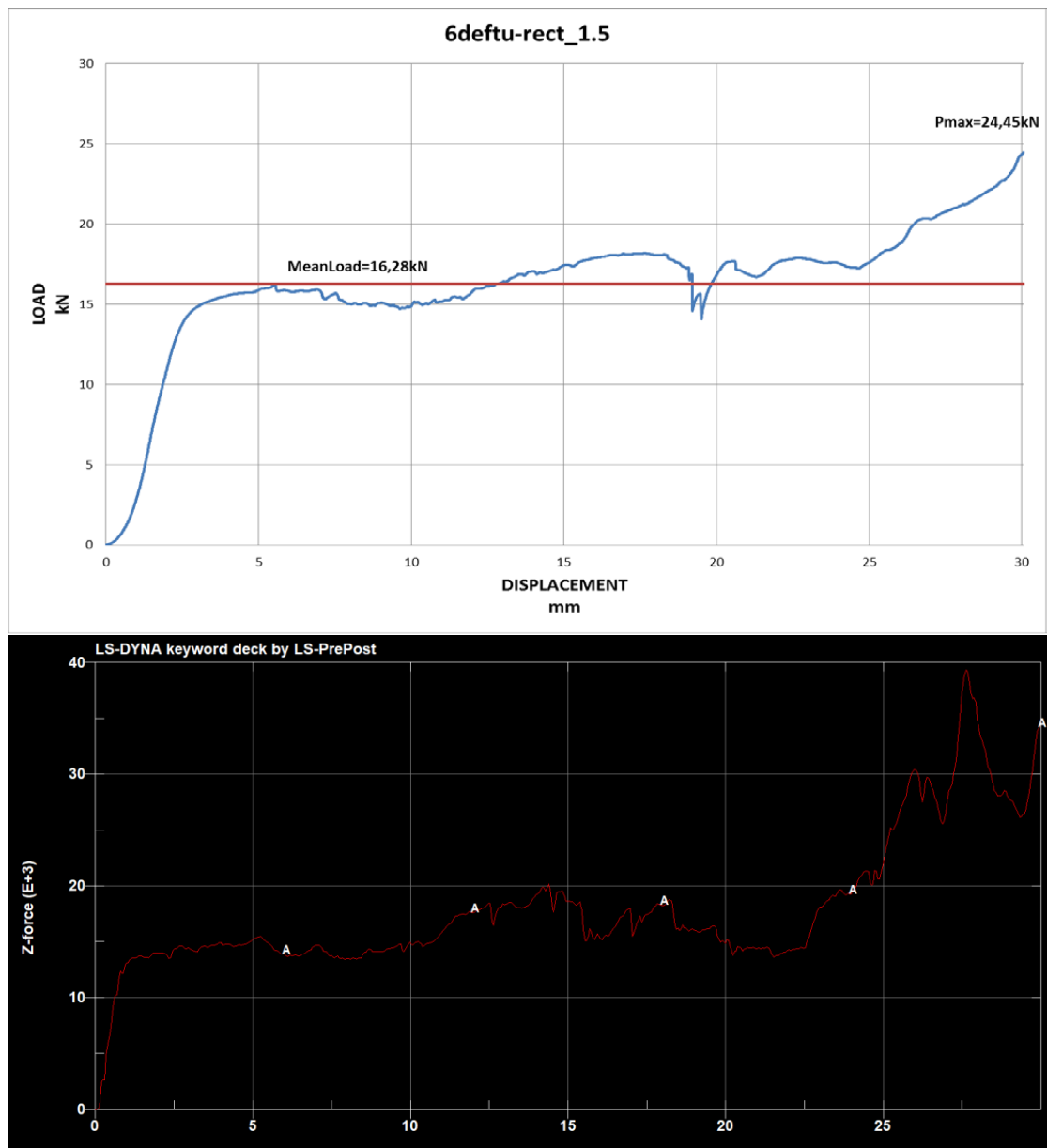
Θέση 9(30mm):



Πίνακας δεδομένων και σύγκρισης:

	$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\max}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
Πειράματος	30	16,28	24,45	0,66	488,4
Μοντέλου	30	17,94	39,37	0,45	538,2

Σύγκριση διαγραμμάτων Φορτίου -Μετατόπισης:



Σχόλια και σύγκριση πειράματος και προσομοίωσης:

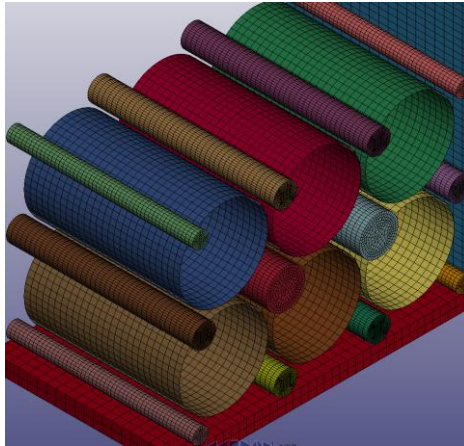
Στα 2,6mm το φορτίο της πλευρικής καταπόνησης έχει φτάσει κοντά στο μέσο φορτίο P_{mean} , έχοντας ξεκινήσει να δημιουργεί τις πλαστικές αρθρώσεις στα δοκίμια και κυρίως στο μεσαίο της κάτω σειράς. Μετά από αυτό το σημείο, παρατηρούμε ότι διατηρείται σχεδόν σταθερή και γύρω από το μέσο φορτίο, με τα δοκίμια να παραμορφώνονται συμμετρικά.

Στο πείραμα το μεσαίο δοκίμιο έχει δημιουργήσει μεγάλη καμπυλότητα και τελικά, στα 19mm περίπου διαδρομής του εμβόλου έχουμε την θραύση του στο σημείο ακριβώς που είχαμε την μεγάλη κάμψη. Αυτό στο διάγραμμα παρατηρείται με την κατακόρυφη πτώση της καμπύλης στο συγκεκριμένο σημείο. Από το σημείο εκείνο και μετά, η καμπύλη εξακολουθεί να κινείται ακολουθώντας το πριν την θραύση μοτίβο, ενώ η τελική αύξηση του φορτίου οφείλεται στον περιορισμό του χώρου που έχουν τα δοκίμια για να παραμορφωθούν και στις μεταξύ τους δυνάμεις από επαφές.

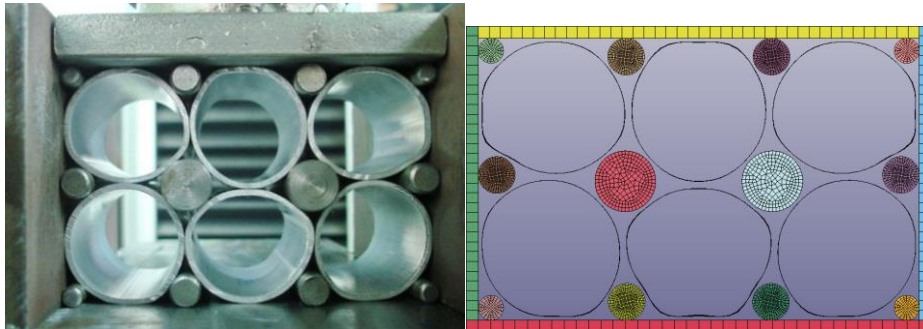
Στη προσομοίωση, δεν έχουμε θραύση και αυτό έχει ως αποτέλεσμα το P_{max} να αυξάνεται αρκετά προς το τέλος της προσομοίωσης. Σε αυτό οφείλεται και η αυξημένη ενέργεια απορρόφησης και η διαφορετική συμπεριφορά στο διάγραμμα μετά τα 25mm.

6.3.4.rect-15-wi (Ορθογωνική διάταξη πάχους 1,5mm με παρεμβλήματα)

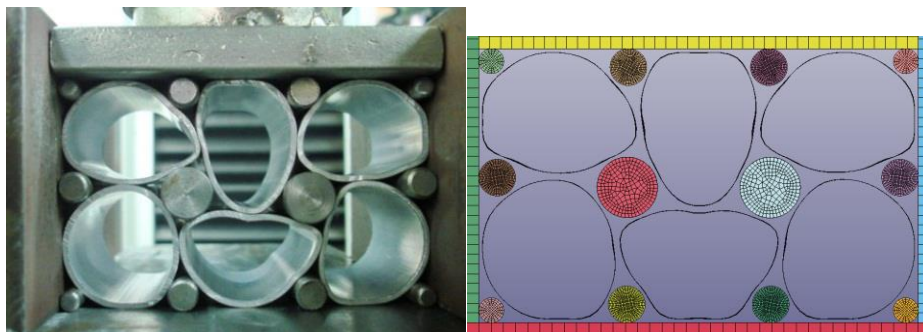
Iso όψη της προσομοίωσης:



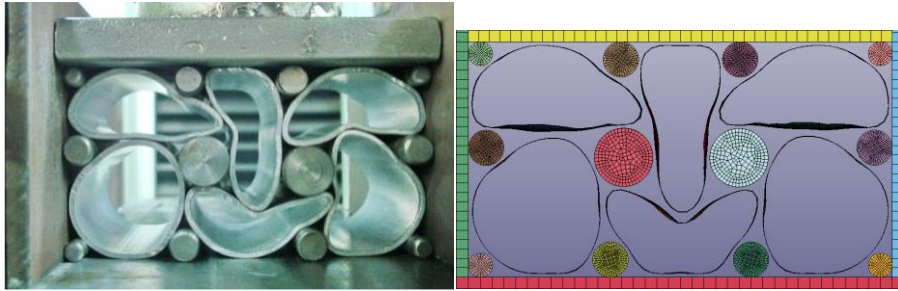
Θέση 1(2,3mm):



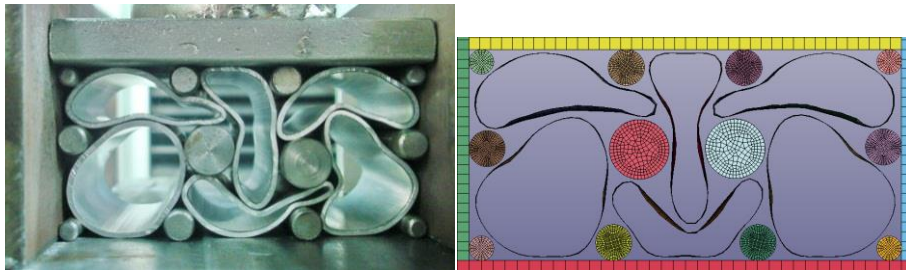
Θέση 2(3,8mm):



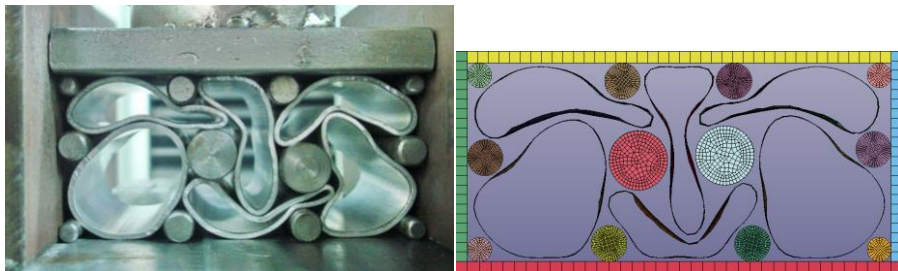
Θέση 3(9,9mm):



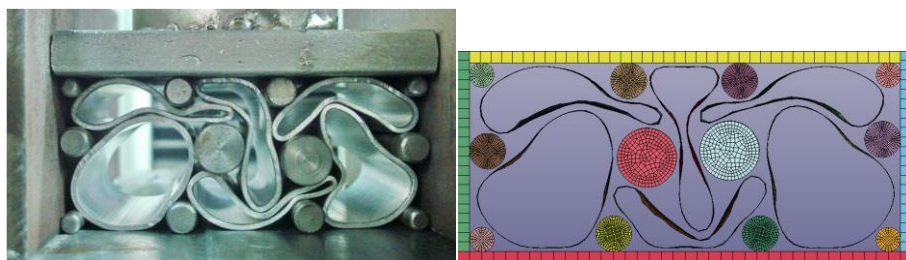
Θέση 4(16,2mm):



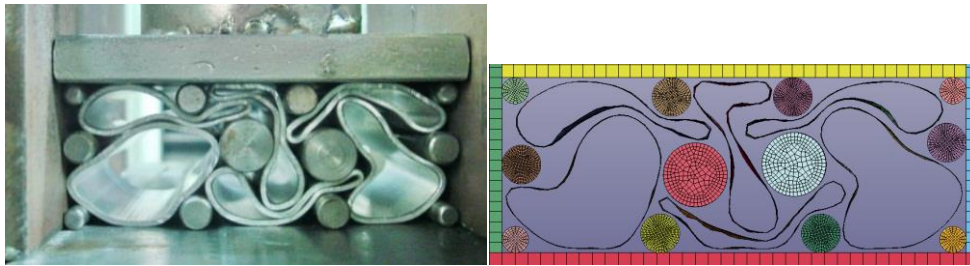
Θέση 5(18,4mm):



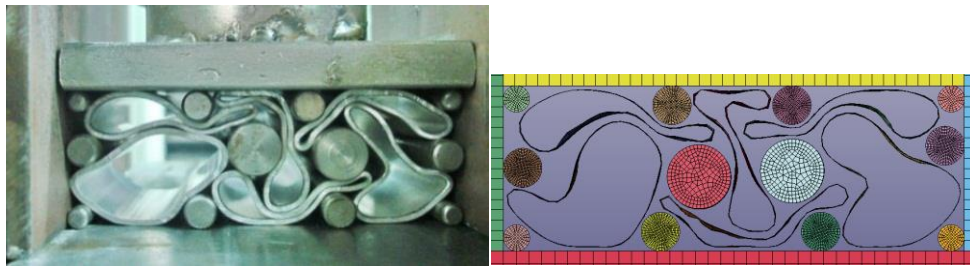
Θέση 6(20,4mm):



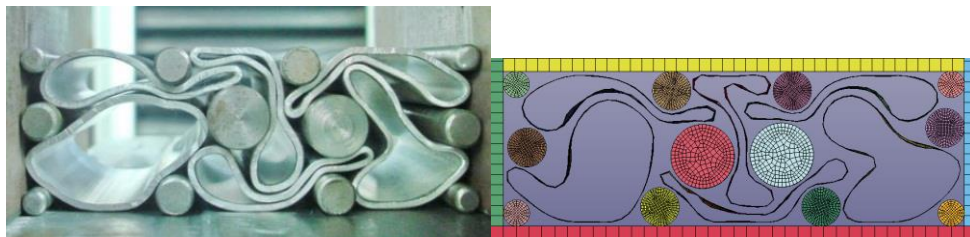
Θέση 7(26,1mm):



Θέση 8(28,1mm):



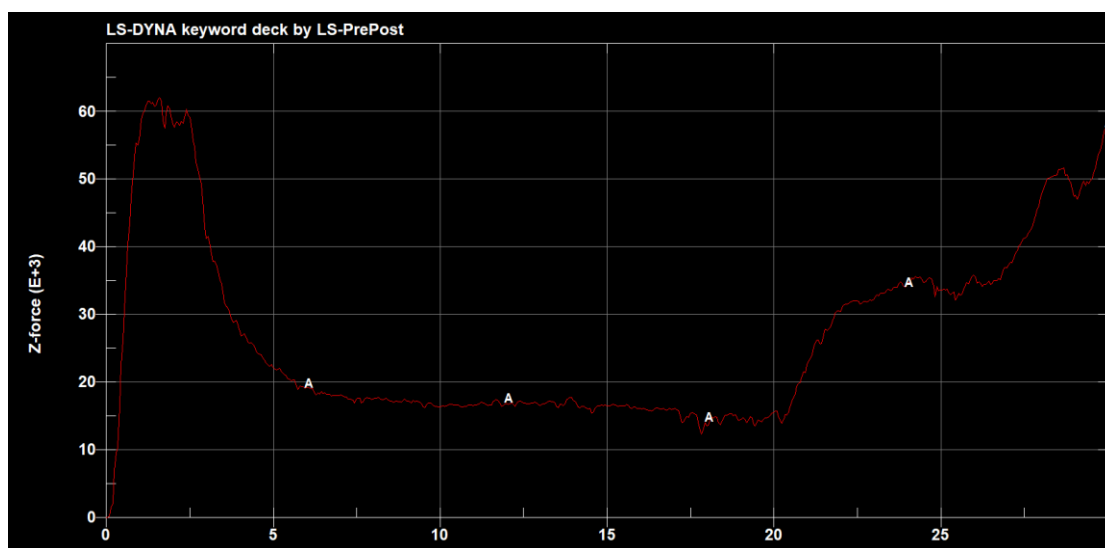
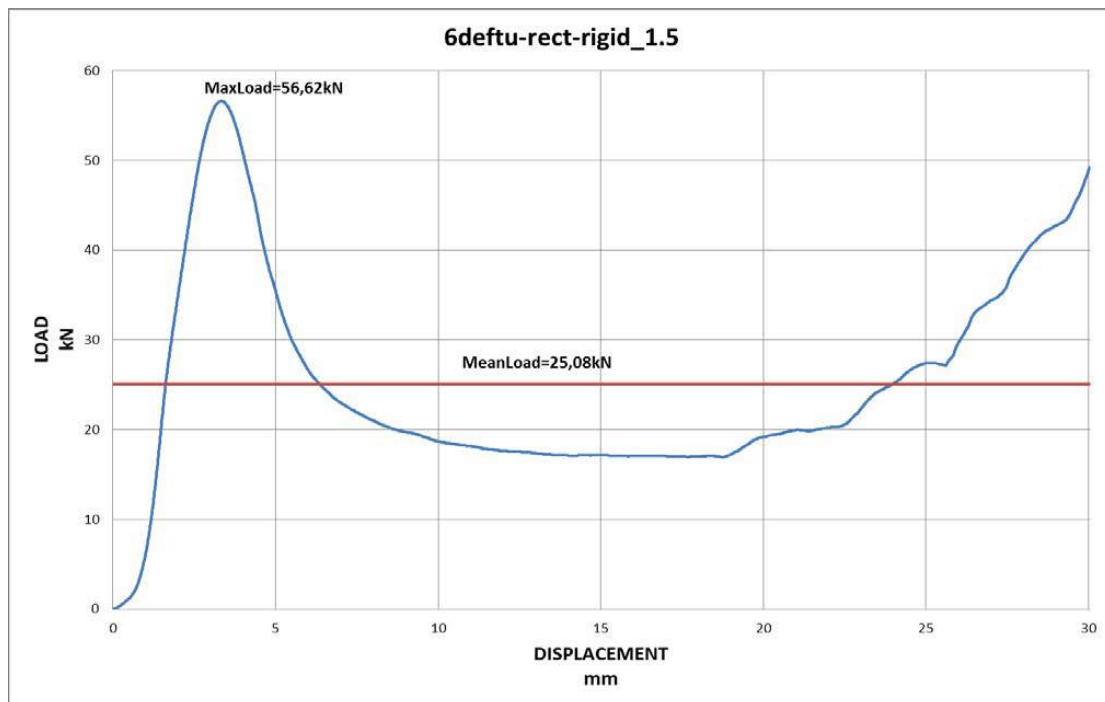
Θέση 9(30mm):



Πίνακας δεδομένων και σύγκρισης:

	$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\max}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
Πειράματος	30	25,08	56,62	0,44	752,4
Μοντέλου	30	26,92	61,97	0,43	807,7

Σύγκριση διαγραμμάτων Φορτίου -Μετατόπισης:



Σχόλια και σύγκριση πειράματος και προσομοίωσης:

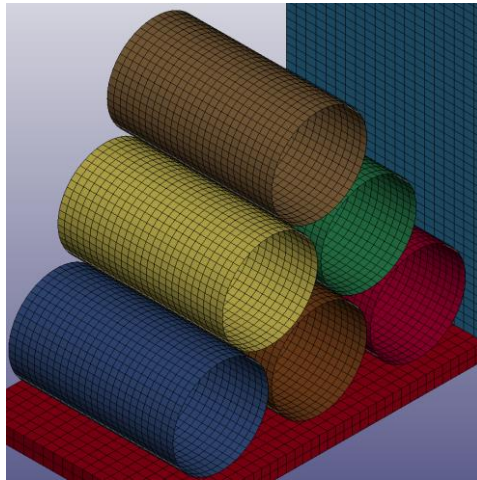
Στα 2,3mm παρατηρούμε την απότομη αύξηση του φορτίου λόγω της εκκίνησης δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων. Τα άκαμπτα παρεμβλήματα είναι υπεύθυνα για την μεγαλύτερη τιμή του φορτίου σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα που ήταν ίδιου πάχους. Μετά την αρχική αύξηση βλέπουμε την σχεδόν κατακόρυφη πτώση της καμπύλης και την είσοδο μας στην περιοχή ομοιομορφίας όπου παραμένει μέχρι και σχεδόν τα 22,5mm πολύ μικρές αυξομειώσεις του φορτίου.

Από το σημείο εκείνο και ύστερα, έχουμε την άνοδο της καμπύλης του φορτίου όπως φαίνεται από τις φωτογραφίες, λόγω της μείωσης του όγκου των δοκιμίων και των επαφών των εσωτερικών επιφανειών ιδίων δοκιμίων μεταξύ τους.

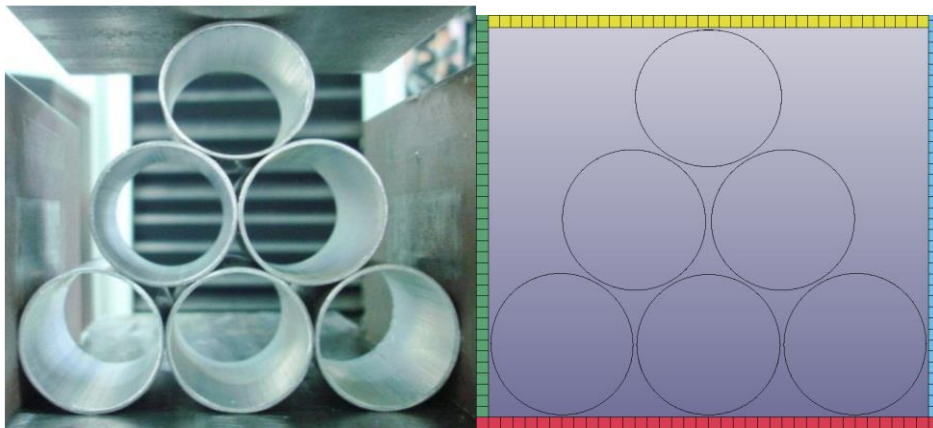
Δεν παρατηρήθηκε καμία θραύση δοκιμίου, ενώ η μεγάλη απορρόφηση ενέργειας είναι κυρίως αποτέλεσμα της αρχικής και τελικής αύξησης της δύναμης, πράγμα που φαίνεται και από τον μικρό συντελεστή ομοιομορφίας CFE.

6.3.5.tri-10-wo (Τριγωνική διάταξη πάχους 1,0mm χωρίς παρεμβλήματα)

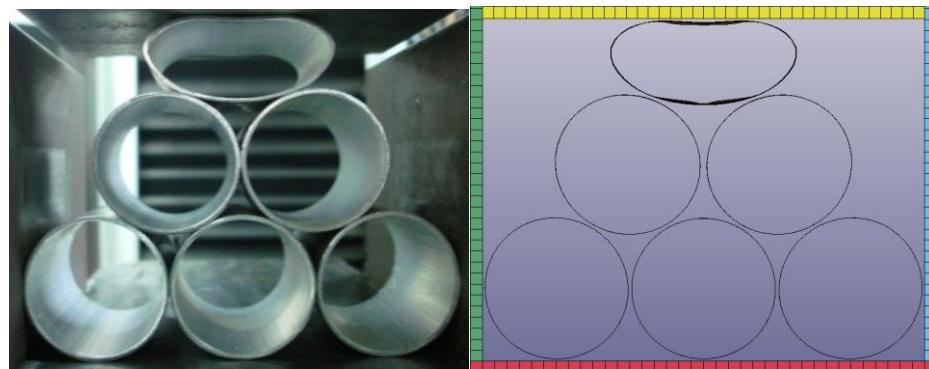
Iso όψη της προσομοίωσης:



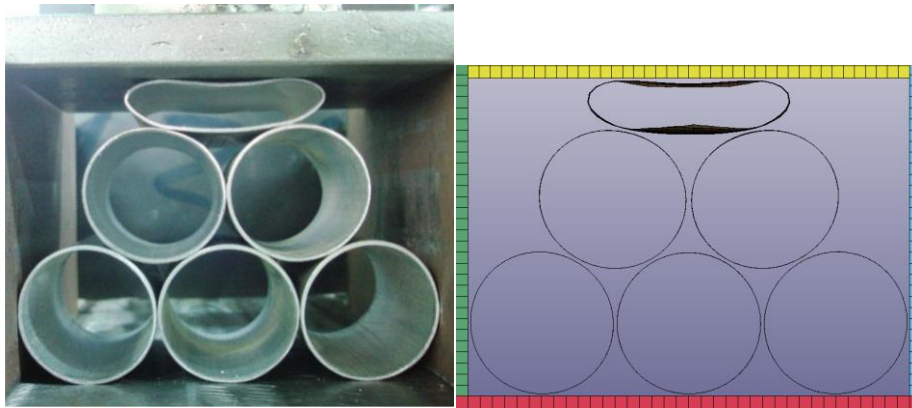
Θέση 1(2,4mm):



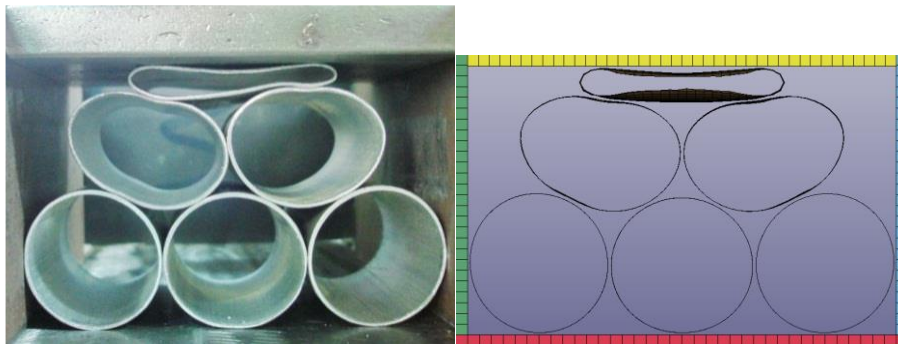
Θέση 2(12mm):



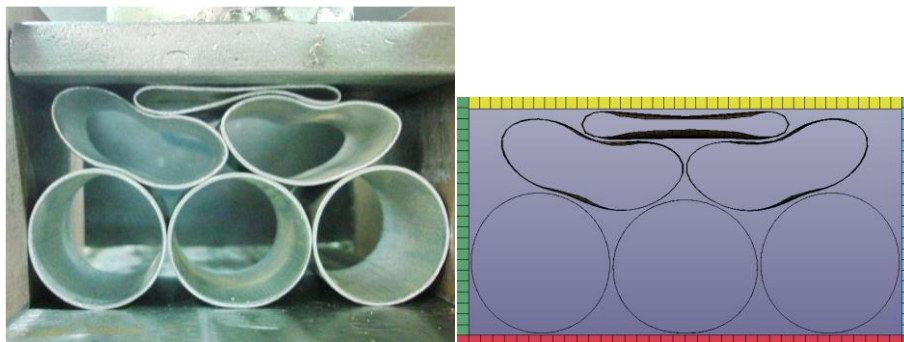
Θέση 3(17,6mm):



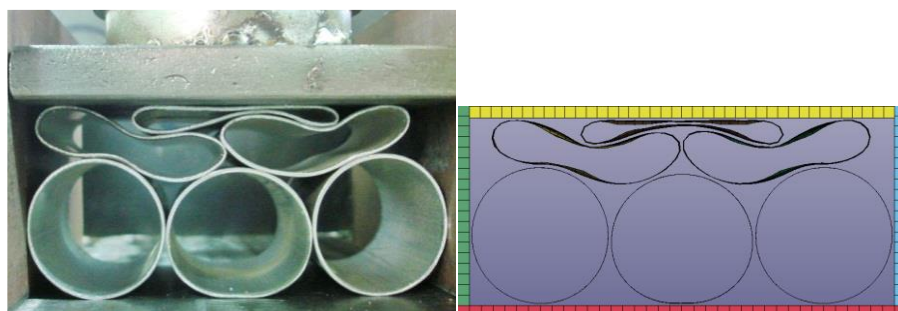
Θέση 4(26,2mm):



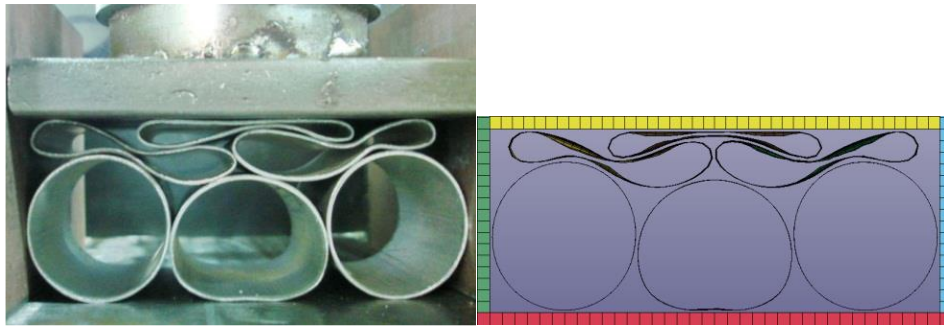
Θέση 5(35mm):



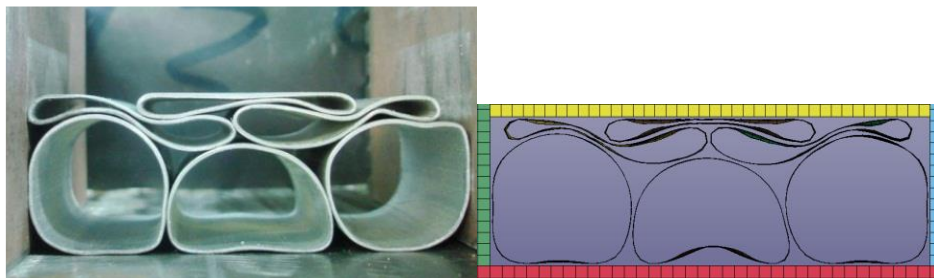
Θέση 6(41,8mm):



Θέση 7(45,8mm):



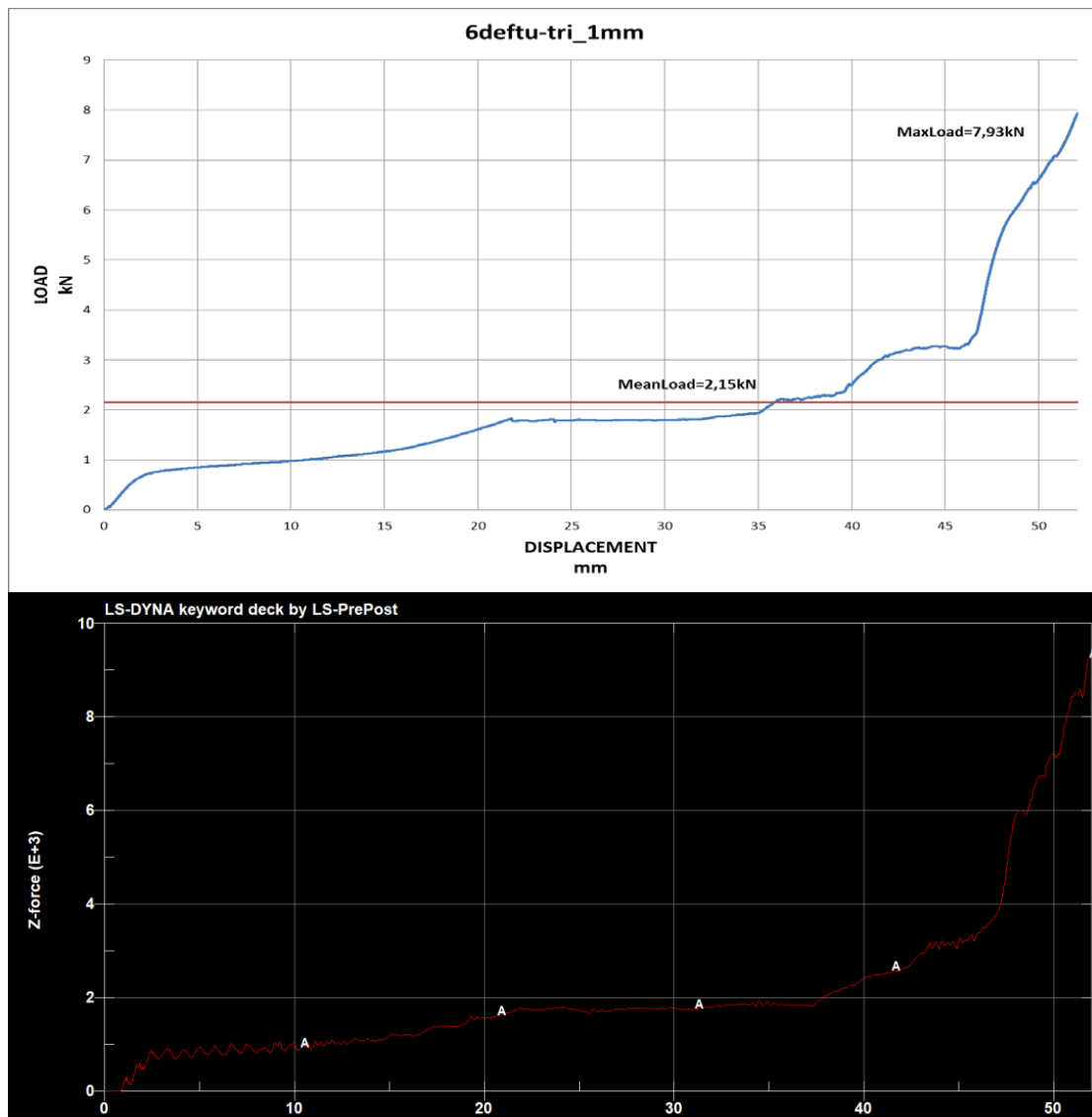
Θέση 8(52mm):



Πίνακας δεδομένων και σύγκρισης:

	$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\max}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
Πειράματος	52	2,15	7,93	0,27	111,8
Μοντέλου	52	2,12	9,34	0,23	110,2

Σύγκριση διαγραμμάτων Φορτίου -Μετατόπισης:



Σχόλια και σύγκριση πειράματος και προσομοίωσης:

Από την αρχή βλέπουμε μία πολύ ομαλή αλλά ταυτόχρονα πολύ μικρής τιμής αύξηση της δύναμης συμπίεσης. Αυτό είναι αποτέλεσμα του μικρού πάχους των δοκιμίων και της μη ύπαρξης τριβών, αφού η διάταξη δεν περιορίζεται αρχικά τουλάχιστον από τις πλευρικές πλάκες. Έτσι, βλέπουμε τις πλαστικές αρθρώσεις να σχηματίζονται πολύ αργά και τις κατώτερες σειρές να μην παίρνουν μέρος στην απορρόφηση ενέργειας, αφού μέχρι και τα 17,5mm περίπου, τα δοκίμια τους παραμένουν απαραμόρφωτα.

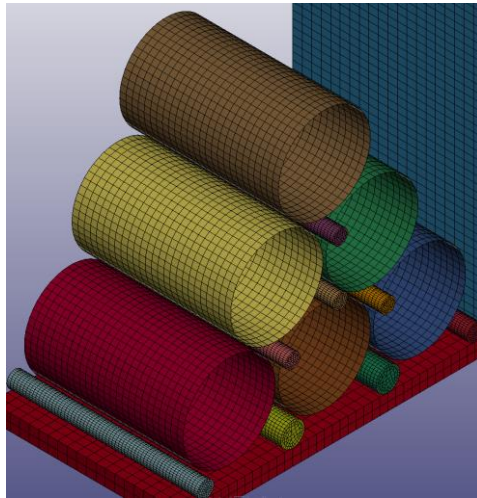
Αντίστοιχα και όταν η δεύτερη σειρά αρχίζει να παραμορφώνεται μετά τα 22mm περίπου βάση διαγράμματος, η τρίτη παραμένει με μικρές μόνο αλλοιώσεις στο κεντρικό δοκίμιο, όπου και αρχίζει η δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων. Η τελική απότομη αύξηση, οφείλεται στην μείωση του όγκου όπου τα δοκίμια μπορούν να παραμορφωθούν και στην επαφή εσωτερικών τοιχωμάτων των ίδιων δοκιμίων μεταξύ τους.

Τελικά το μικρό πάχος των δοκιμίων σε συνδυασμό με την απουσία πλευρικών ορίων για το μεγαλύτερο μήκος μετατόπισης του εμβόλου, δεν δημιουργεί ρωγμές και το ποσό ενέργειας που απορροφά η συγκεκριμένη διάταξη είναι πολύ χαμηλή.

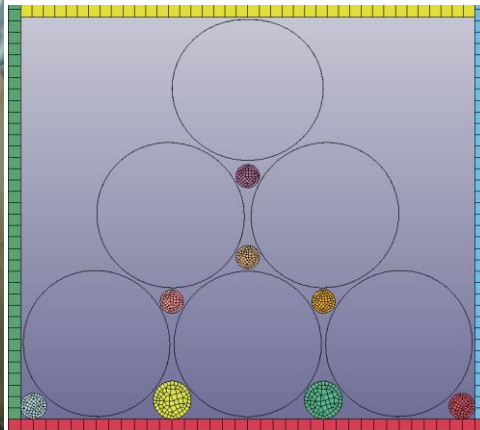
Τα αποτελέσματα του πειράματος και της προσομοίωσης είναι σχεδόν ίδια, όπως και οι καμπύλες μετατόπισης-φορτίου.

6.3.6.tri-10-wi (Τριγωνική διάταξη πάχους 1,0mm με παρεμβλήματα)

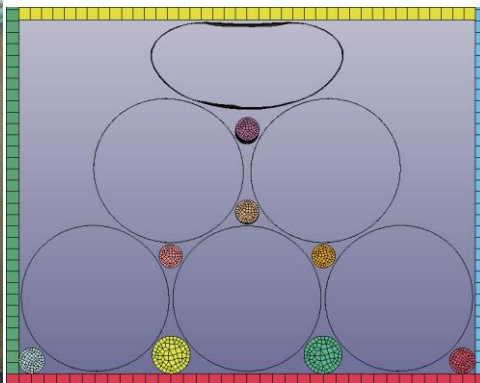
Iso όψη της προσομοίωσης:



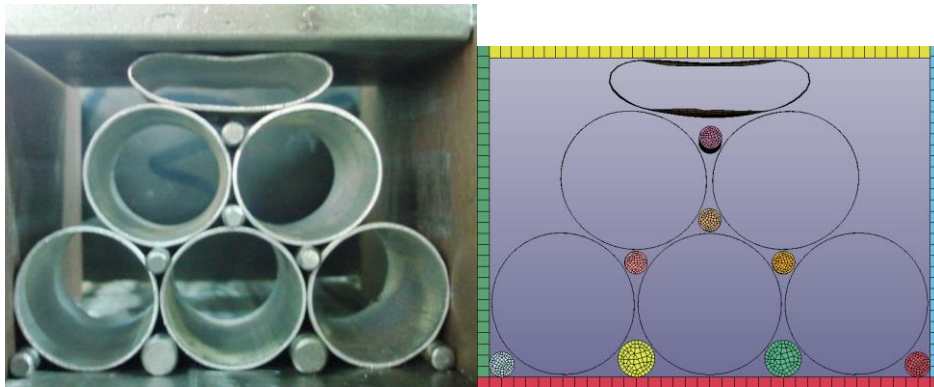
Θέση 1(2,5mm):



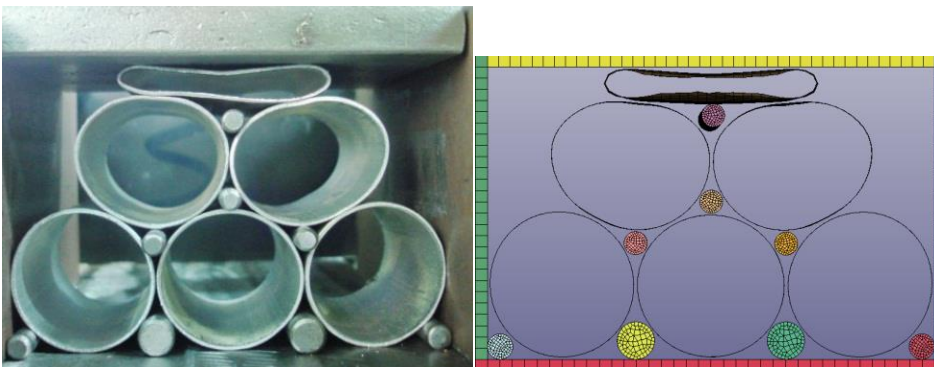
Θέση 2(11,8mm):



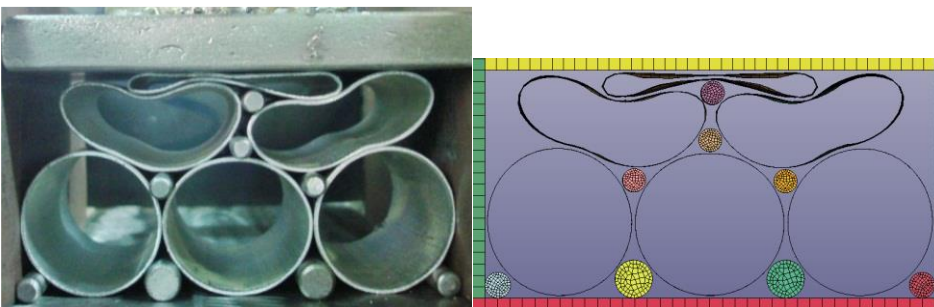
Θέση 3(17mm):



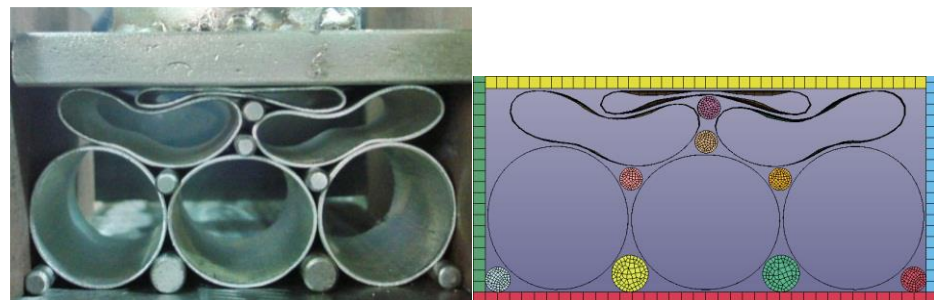
Θέση 4(23,4mm):



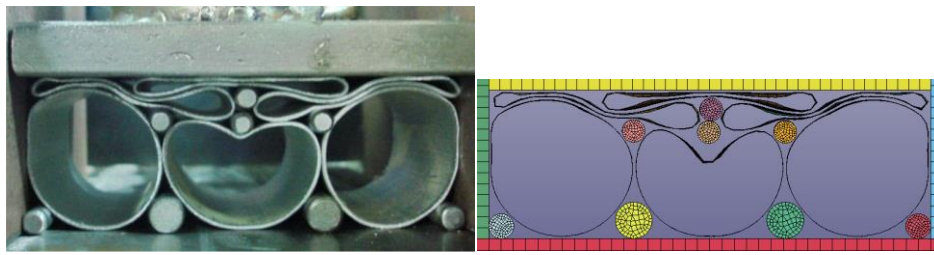
Θέση 5(36,7mm):



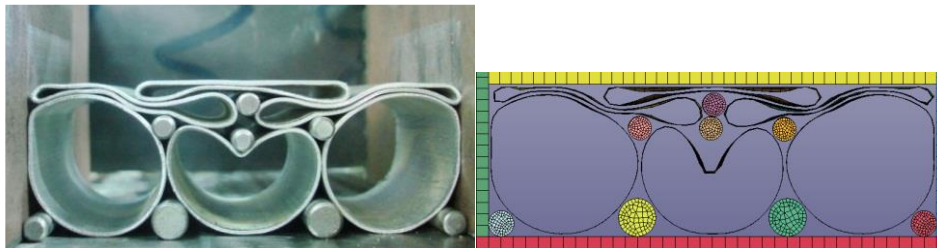
Θέση 6(40,3mm):



Θέση 7(51,3mm):



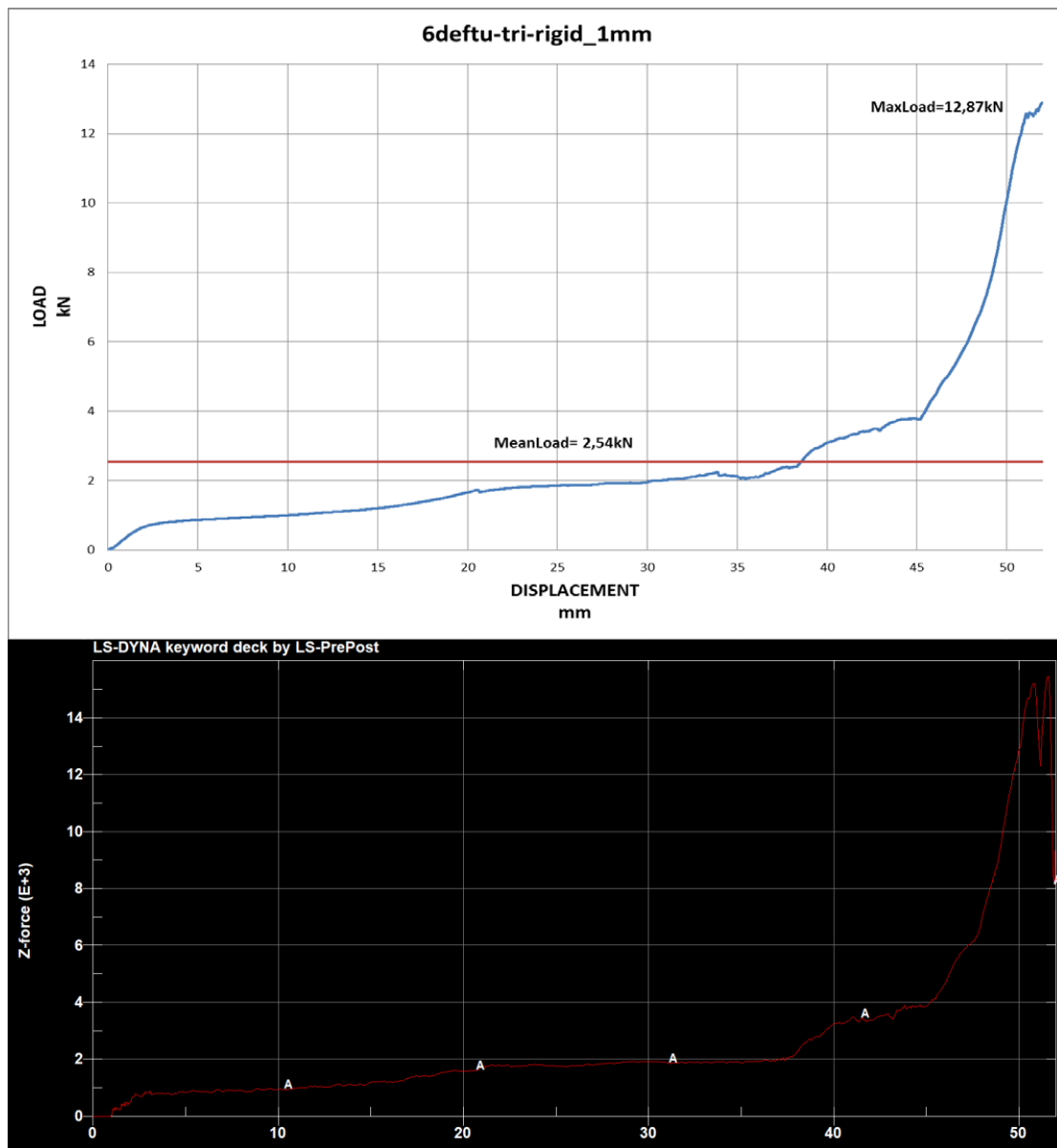
Θέση 8(52mm):



Πίνακας δεδομένων και σύγκρισης:

	$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\max}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
Πειράματος	52	2,54	12,88	0,19	132,08
Μοντέλου	52	2,66	15,70	0,17	138,28

Σύγκριση διαγραμμάτων Φορτίου -Μετατόπισης:



Σχόλια και σύγκριση πειράματος και προσομοίωσης:

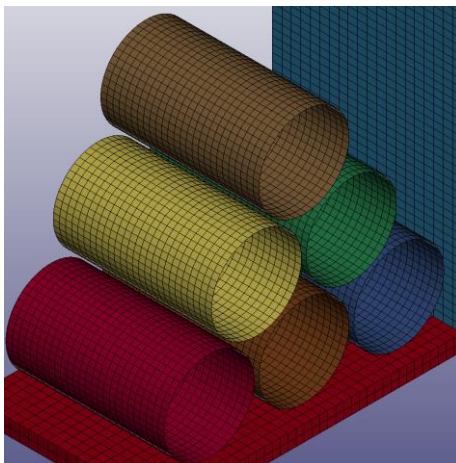
Από την αρχή του πειράματος και παρά την ύπαρξη των άκαμπτων παρεμβλημάτων, η αύξηση της καμπύλης του φορτίου είναι πολύ χαμηλή και μέχρι σχεδόν τα 21mm τα δοκίμια της μεσαίας σειράς παραμένουν απαραμόρφωτα,. Παρατηρούμε την δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων και στη μεσαία σειρά των δοκιμίων χωρίς όμως αυτό να ακολουθείται από κάποια σημαντική αύξηση του φορτίου.

Τελικά, η παραμόρφωση της τρίτης σειράς, η εισχώρηση του παρεμβλήματος στο μεσαίο δοκίμιο καθώς και η ολοκληρωτική συμπίεση των επάνω δοκιμίων οδηγούν στην απότομη αύξηση του φορτίου. Ταυτόχρονα παρατηρείται η δημιουργία ρωγμής στο κεντρικό δοκίμιο, η οποία όμως δεν οδηγεί σε ολική θραύση εξαιτίας του μικρού πάχους των δοκιμίων.

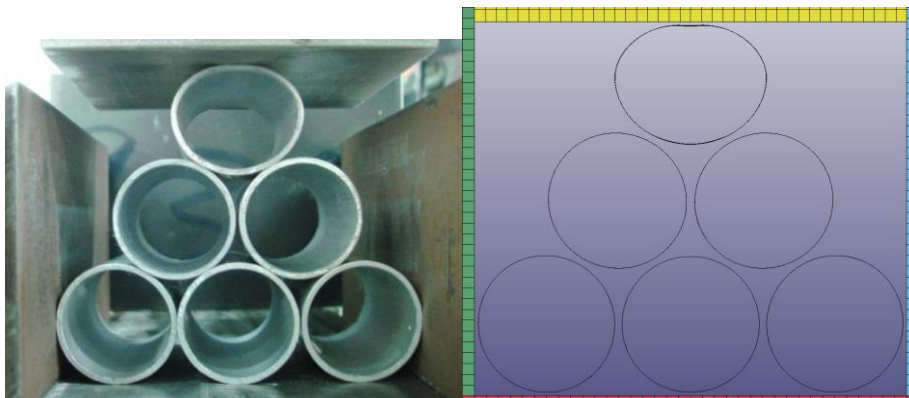
Το τελικό προφίλ της διάταξης είναι πολύ συμμετρικό αλλά τα δεδομένα που μας δεν είναι ικανοποιητικά, τα οποία επιβεβαιώνονται και τη προσομοίωση.

6.3.7.tri-15-wo (Τριγωνική διάταξη πάχους 1,5mm χωρίς παρεμβλήματα)

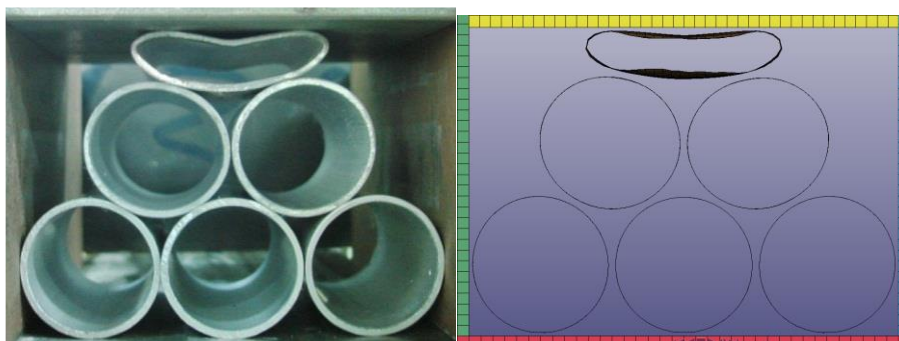
Iso όψη της προσομοίωσης:



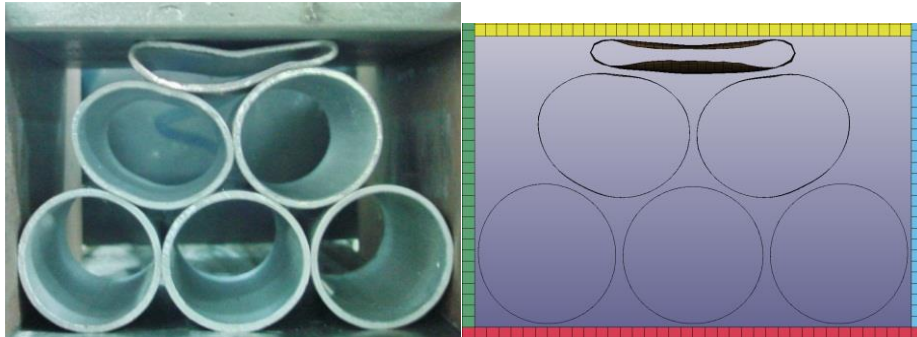
Θέση 1(4,1mm):



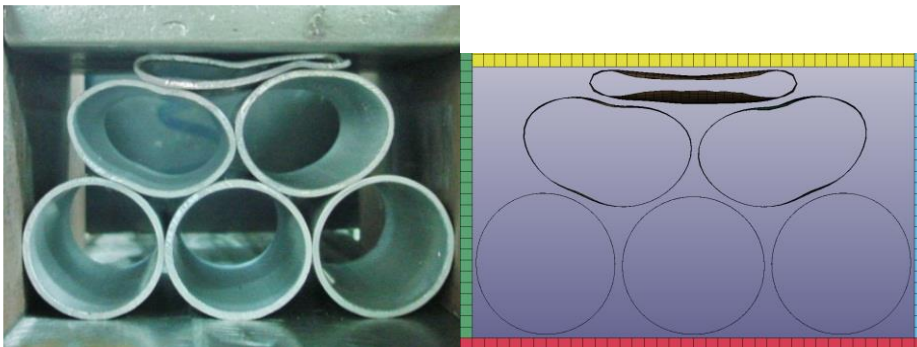
Θέση 2(17,3mm):



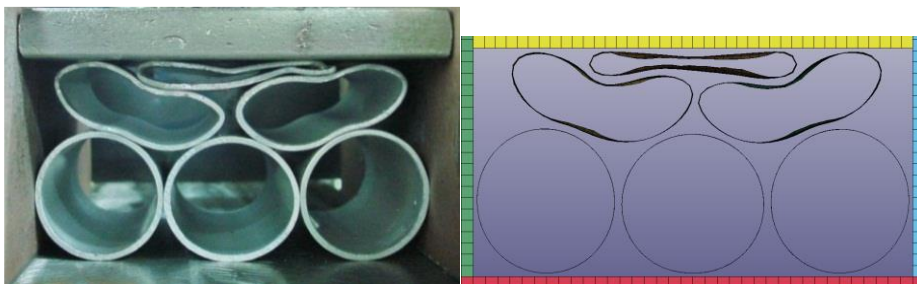
Θέση 3(22,4mm):



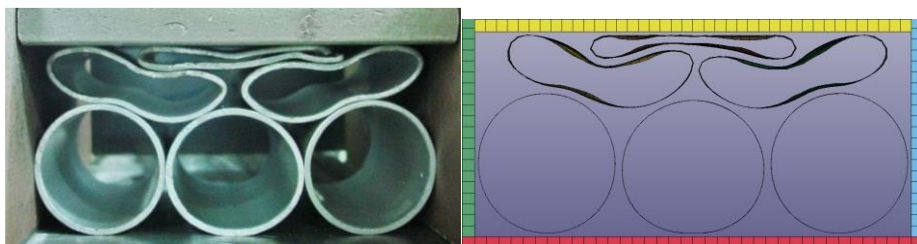
Θέση 4(27mm):



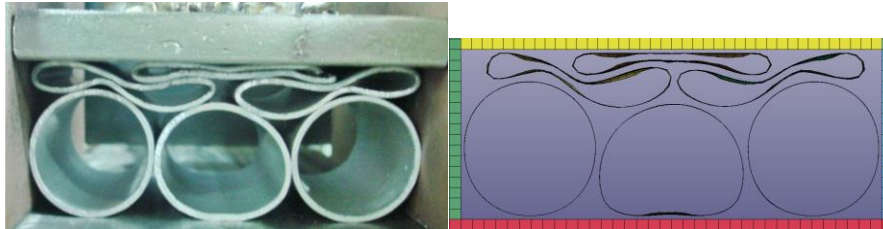
Θέση 5(36,4mm):



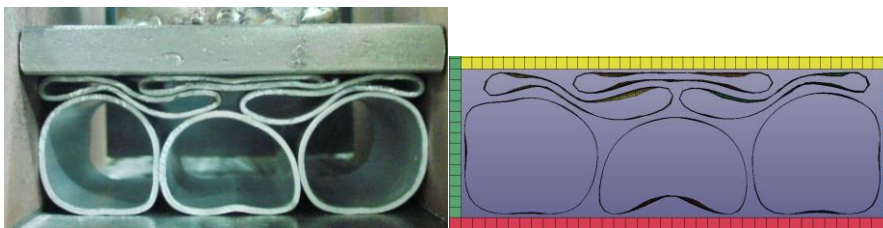
Θέση 6(40mm):



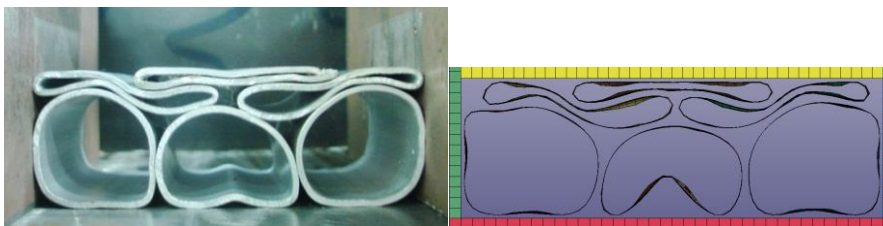
Θέση 7(45,8mm):



Θέση 8(50,4mm):



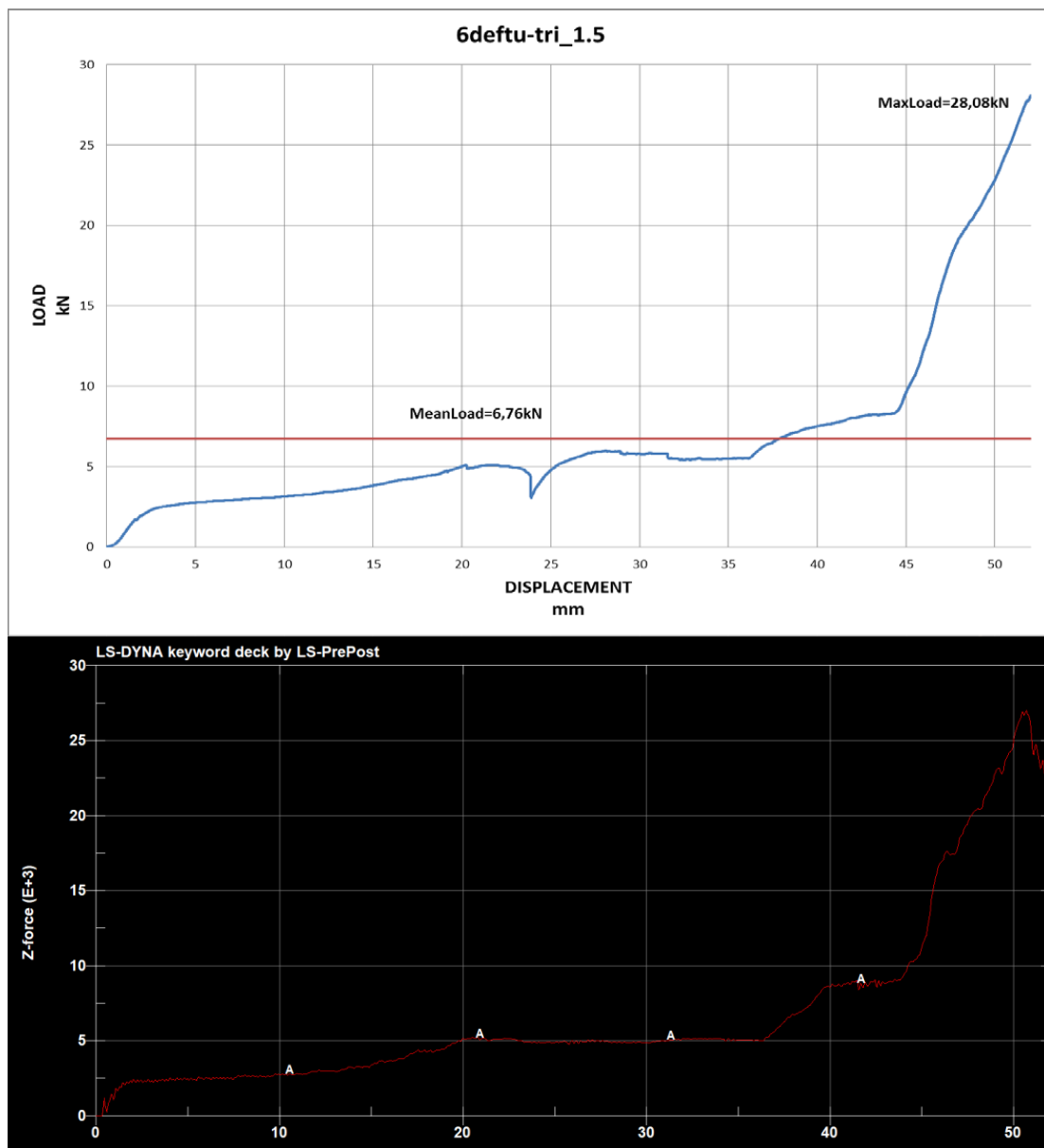
Θέση 9(52mm):



Πίνακας δεδομένων και σύγκρισης:

	$S_{max}(mm)$	$P_{mean}(kN)$	$P_{max}(kN)$	CFE	$E_{abs}(J)$
Πειράματος	52	6,76	28,08	0,24	351,52
Μοντέλου	52	6,86	26,98	0,25	356,88

Σύγκριση διαγραμμάτων Φορτίου -Μετατόπισης:



Σχόλια και σύγκριση πειράματος και προσομοίωσης:

Η τριγωνική διάταξη με πάχος δοκιμίων 1,5mm παρουσιάζει και αυτό ομαλή αύξηση του φορτίου κρούσης λόγω της μη ύπαρξης των πλευρικών περιορισμών και έτσι το κορυφαίο δοκίμιο παραμορφώνεται χωρίς να επηρεάζει τα υπόλοιπα τουλάχιστον μέχρι τα 17,5mm διαδρομής του εμβόλου.

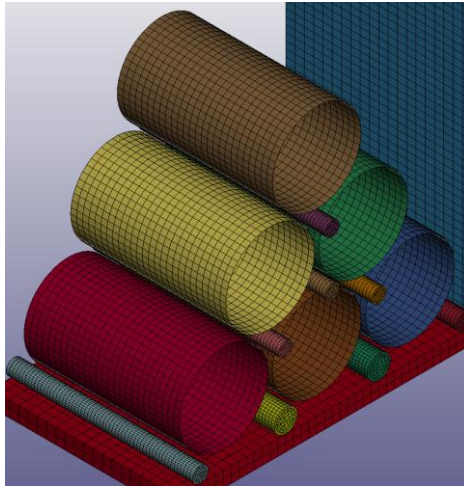
Ανάμεσα στις θέσεις 3 και 4 γίνεται θραύση του υλικού σε σημείο του κορυφαίου δοκιμίου που έχει δημιουργηθεί πλαστική άρθρωση, όπως απεικονίζεται και στο διάγραμμα με την μικρή κατακόρυφη πτώση της καμπύλης. Αυτό συμβαίνει επειδή η εφελκυστική τάση που δημιουργείται στα άκρα του είναι μεγαλύτερη από το όριο θραύσης του υλικού.

Στη συνέχεια υπάρχει δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στη μεσαία σειρά δοκιμίων, χωρίς ακόμα την συμμετοχή της τελευταίας, αφού τα δοκίμια της παραμένουν απαραμόρφωτα. Λίγο πριν τα 45mm μετατόπισης του εμβόλου ξεκινάει η τελική και απότομη αύξηση του φορτίου αφού ο χώρος μειώνεται πολύ και τα τελευταία τρία δοκίμια ξεκινούν την δημιουργία των αρθρώσεων σε περιορισμένο πλέον χώρο.

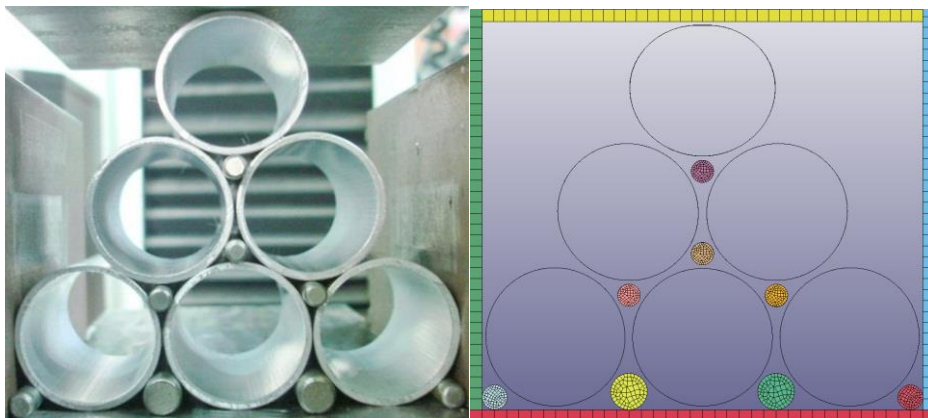
Και στις δύο περιπτώσεις, διαγράμματα και δεδομένα είναι πολύ κοντά.

6.3.8.tri-15-wi (Τριγωνική διάταξη 1,5mm με παρεμβλήματα)

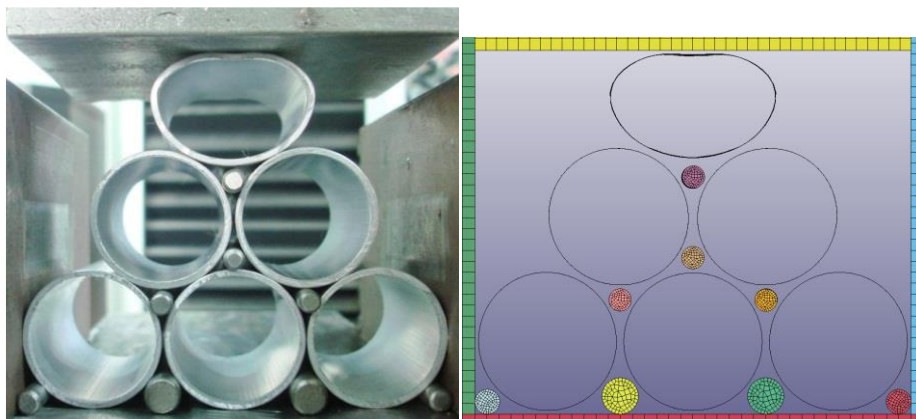
Iso όψη της προσομοίωσης:



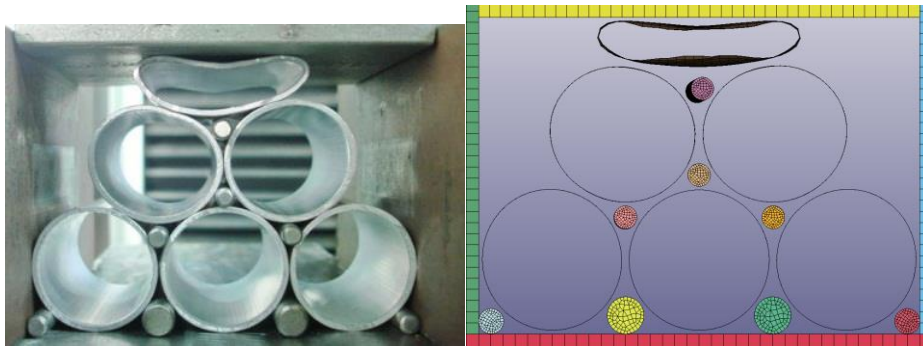
Θέση 1(2,2mm):



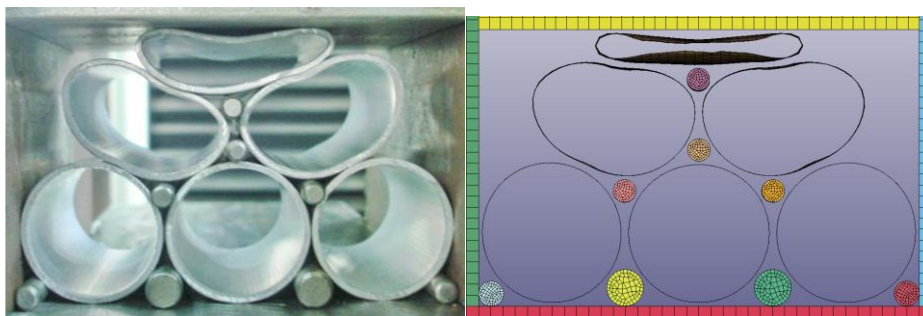
Θέση 2(7mm):



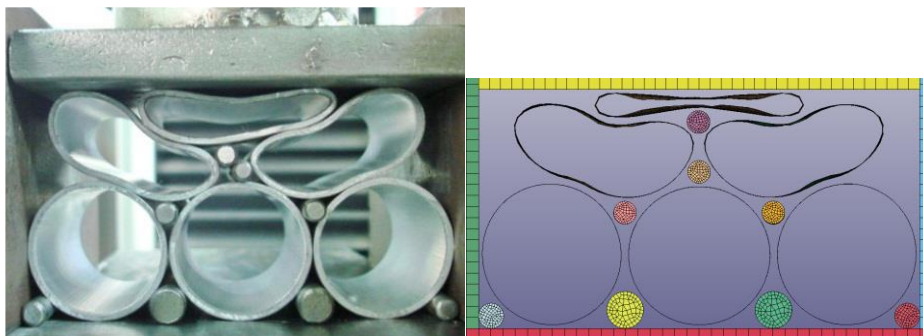
Θέση 3(17,8mm):



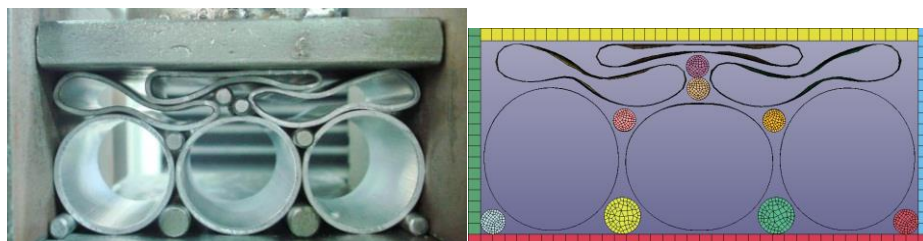
Θέση 4(25,4mm):



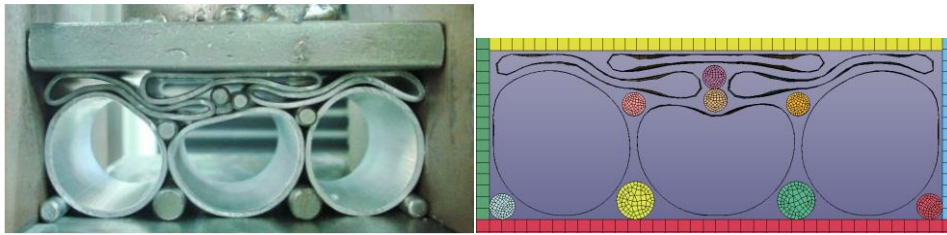
Θέση 5(33,5mm):



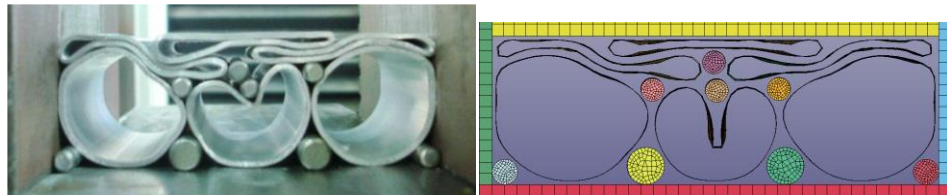
Θέση 6(42,7mm):



Θέση 7(48,3mm):



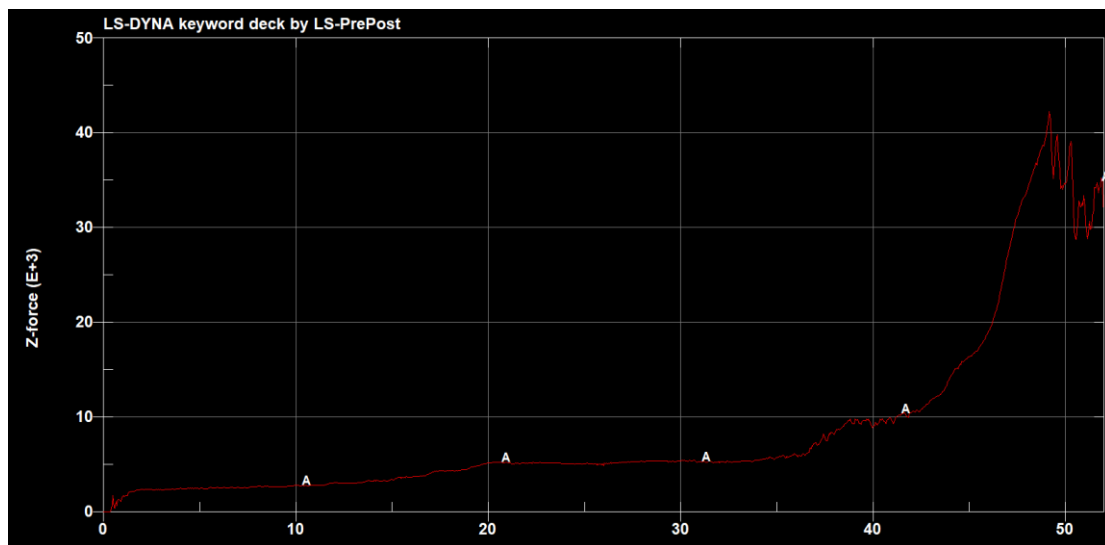
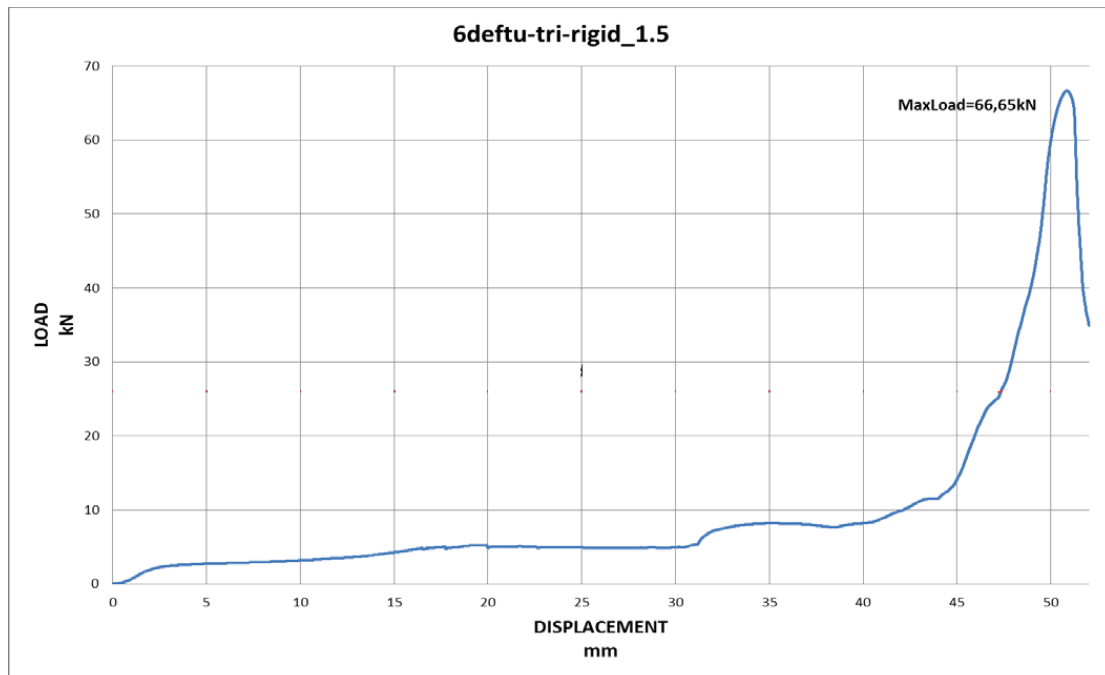
Θέση 8(52mm):



Πίνακας δεδομένων και σύγκρισης:

	$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\max}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
Πειράματος	52	9,85	66,656	0,15	512,2
Μοντέλου	52	8,55	42,554	0,20	444,9

Σύγκριση διαγραμμάτων Φορτίου -Μετατόπισης:



Σχόλια και σύγκριση πειράματος και προσομοίωσης:

Η καμπύλη φορτίου παραμόρφωσης έχει πολύ ομαλή αύξηση σε όλο σχεδόν το μήκος πράγμα που μπορεί να διαπιστωθεί από την ομοιομορφία της παραμόρφωσης των δοκιμίων. Δημιουργούνται τοπικά οι αρθρώσεις αρχικά στο επάνω δοκίμιο και κατόπιν στις δεύτερης σειράς.

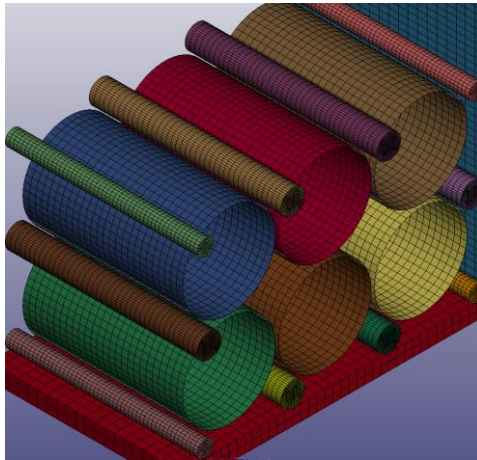
Μετά τα 43mm μετατόπισης του εμβόλου και αφού τα κεντρικά παρεμβλήματα αρχίζουν να εισχωρούν στο κεντρικό δοκίμιο της κάτω σειράς, δημιουργείται και σε αυτό κεντρική άρθρωση με δημιουργία μεγάλης καμπυλότητας.

Και εδώ, η μείωση του όγκου όπου τα δοκίμια μπορούν να συμπιεστούν και η επαφή εσωτερικών επιφανειών ιδίων δοκιμίων είναι ο λόγος της απότομης αύξησης του φορτίου. Η τελική απότομη πτώση της καμπύλης, οφείλεται στην θραύση της δεξιάς άρθρωσης του δεξιού μεσαίου δοκιμίου. Στη προσομοίωση δεν έχουμε θραύση για αυτό και δεν έχουμε απότομη πτώση στο φορτίο.

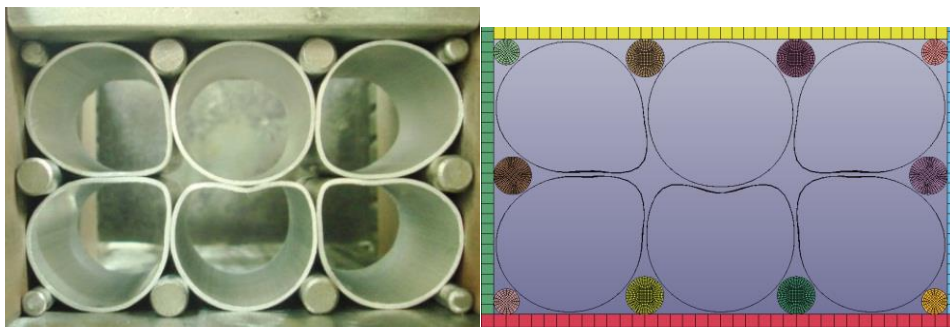
Η μεγαλύτερη ενέργεια απορρόφησης στο πείραμα, οφείλεται στη κίνηση των κεντρικών απαραμόρφωτων, αφού έρχονται σε επαφή νωρίτερα σε σχέση με τη προσομοίωση, με αποτέλεσμα την αύξηση του φορτίου πιο νωρίς από την αντίστοιχη προσομοίωση.

6.3.9.rect-10-woR1 (Ορθογωνική διάταξη πάχους 1,0mm χωρίς κεντρικά παρεμβλήματα)

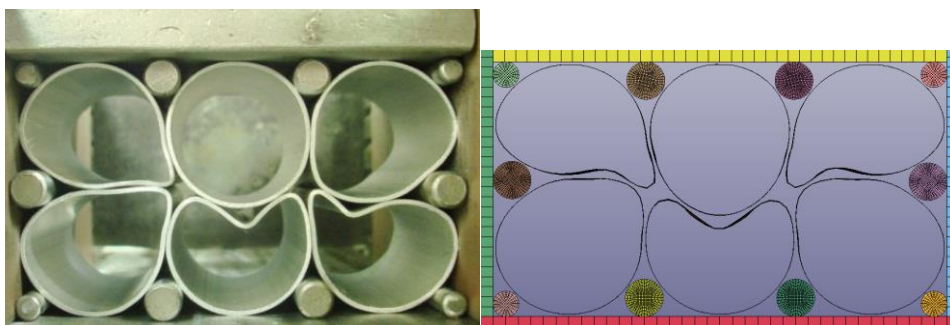
Iso όψη της προσομοίωσης:



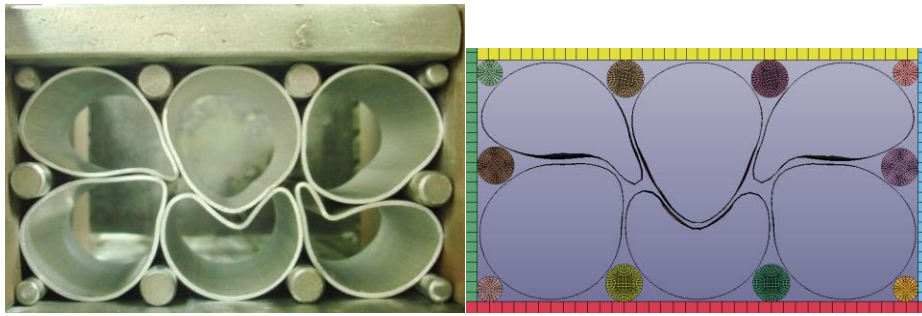
Θέση 1(5,6mm):



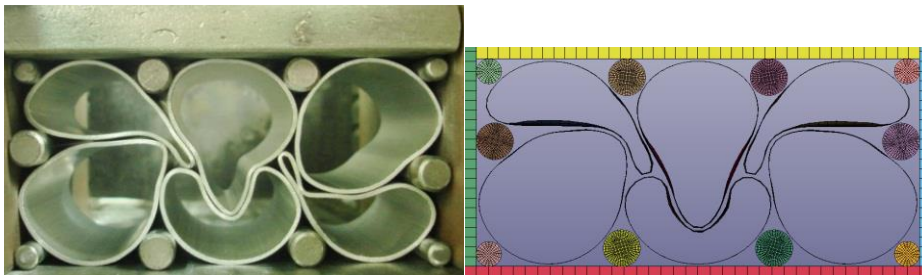
Θέση 2(9,1mm):



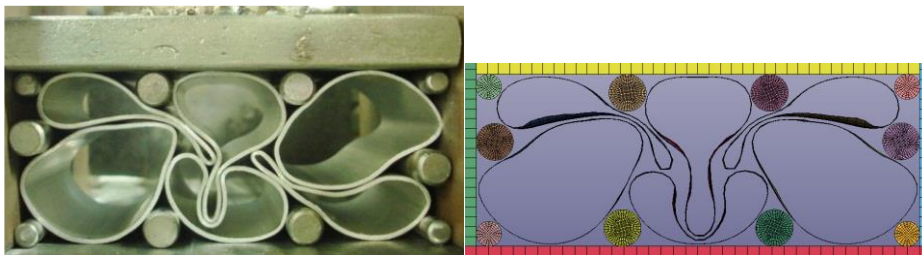
Θέση 3(11,4mm):



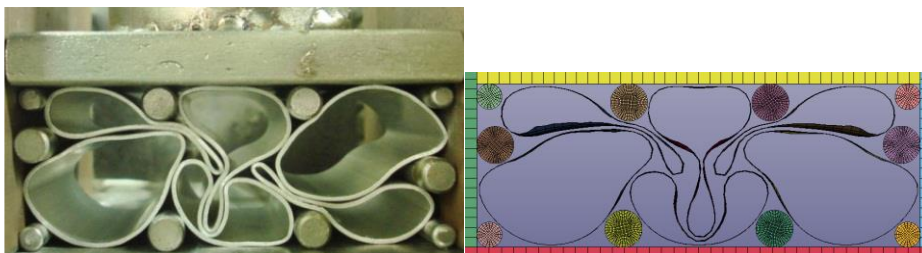
Θέση 4(17,5mm):



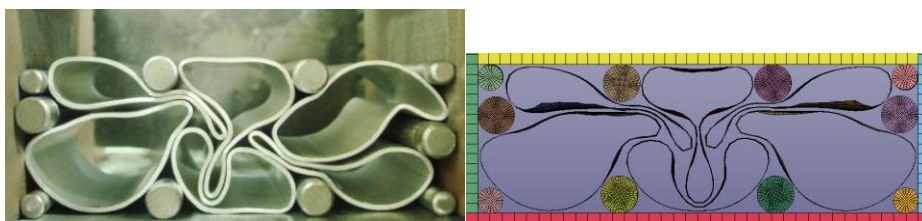
Θέση 5(24,8mm):



Θέση 6(27,2mm):



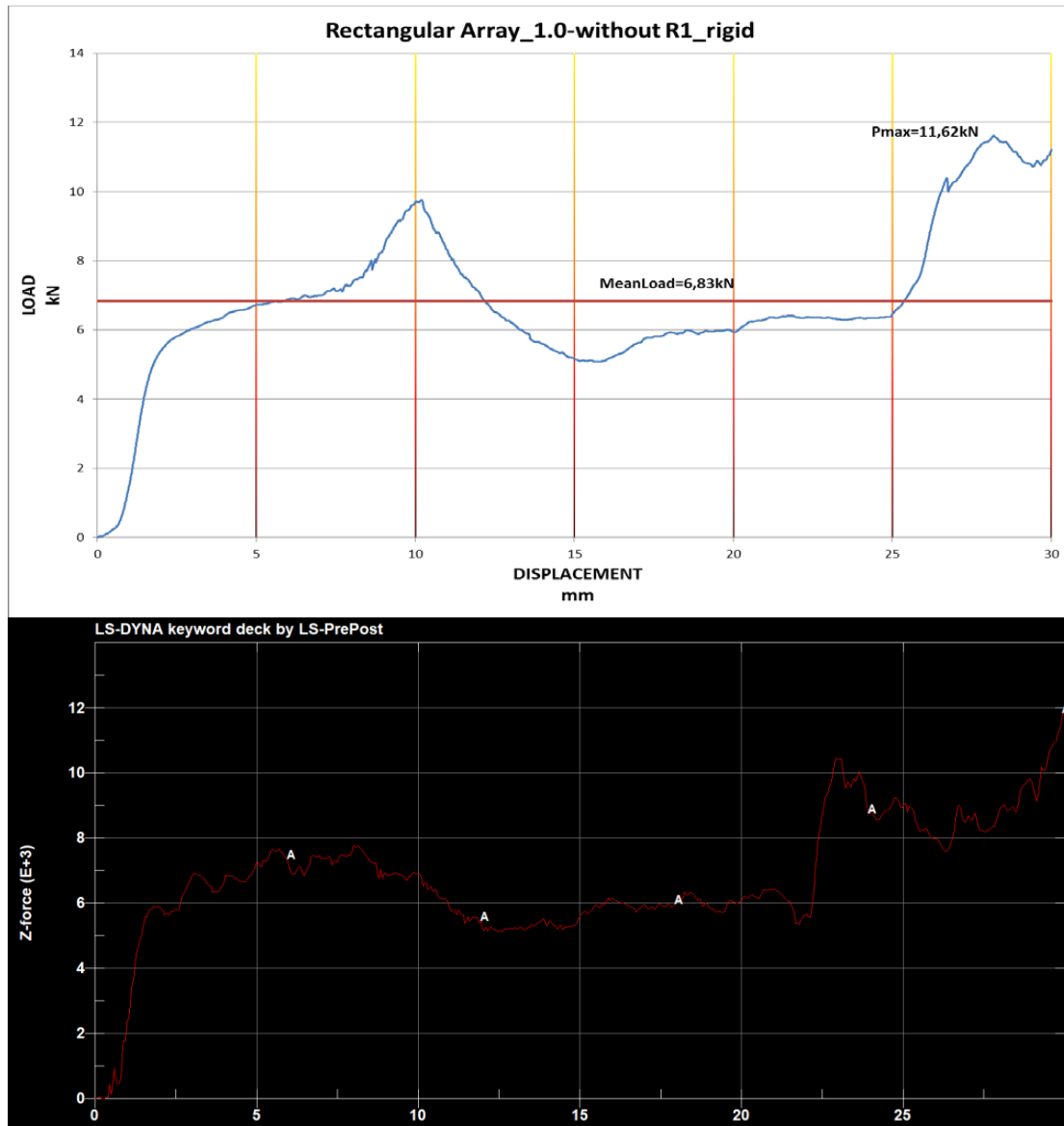
Θέση 7(30mm):



Πίνακας δεδομένων και σύγκρισης:

	$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\max}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
Πειράματος	30	6,83	11,62	0,59	204,9
Μοντέλου	30	6,75	12,05	0,56	202,5

Σύγκριση διαγραμμάτων Φορτίου -Μετατόπισης:



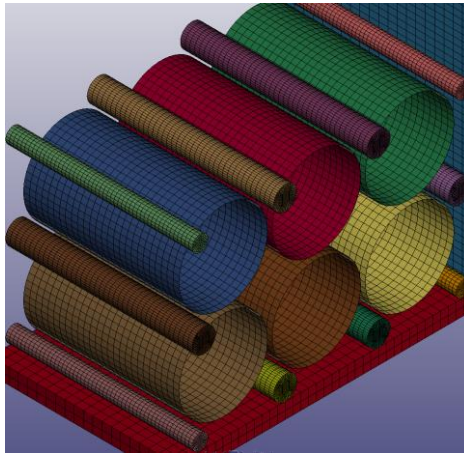
Σχόλια και σύγκριση πειράματος και προσομοίωσης:

Παρατηρούμε ότι με τη απουσία των κεντρικών απαραμόρφωτων παρεμβλημάτων η καμπύλη του φορτίου δεν δημιουργεί την αρχική μεγάλη αύξηση, καθώς τα δοκίμια βρίσκουν περισσότερους χώρους να εισχωρήσουν και μικρότερη αντίσταση. Έτσι η καμπύλη συγκλίνει ταχύτερα κοντά στην περιοχή του μέσου φορτίου.

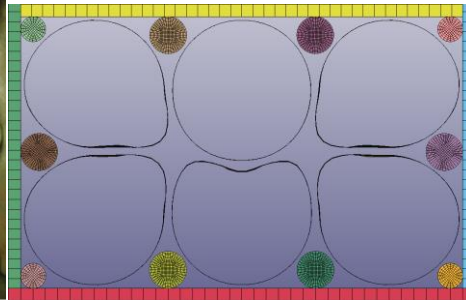
Και σε αυτό το πείραμα βλέπουμε την δημιουργία των πλαστικών αρθρώσεων. Στις θέσεις 3, 4 και 5 φαίνεται ότι το υλικό από τα δοκίμια που παραμορφώνονται κατευθύνεται προς το κέντρο της διάταξης. Όταν η μεγάλη καμπυλότητα που έχει δημιουργηθεί στο κεντρικό κάτω δοκίμιο ακουμπήσει στο κάτω μέρος της διάταξης, έχουμε την τελική αύξηση της δύναμης και άρα και της ενέργειας απορρόφησης.

6.3.10.rect-15-woR1 (Ορθογωννική διάταξη πάχους 1,5mm χωρίς κεντρικά παρεμβλήματα)

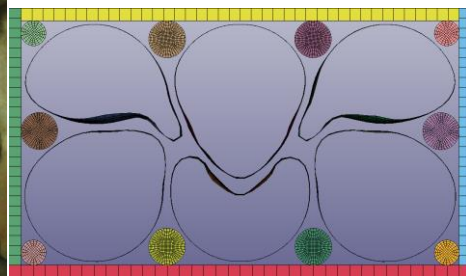
Iso όψη της προσομοίωσης:



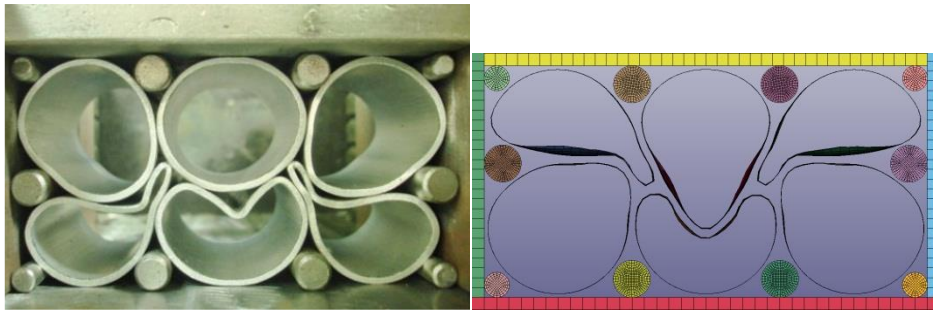
Θέση 1(5,2mm):



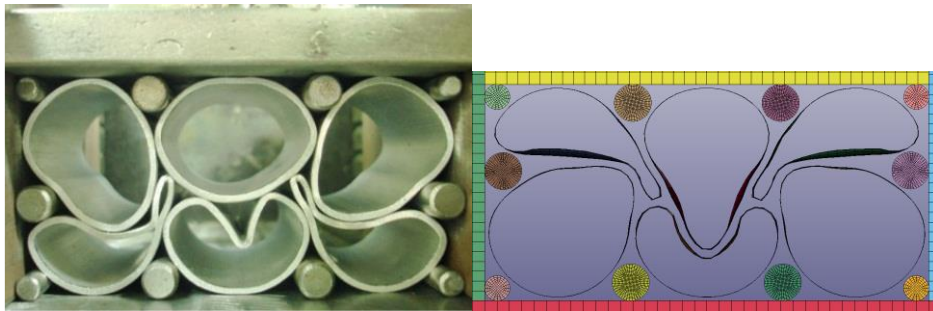
Θέση 2(10,4mm):



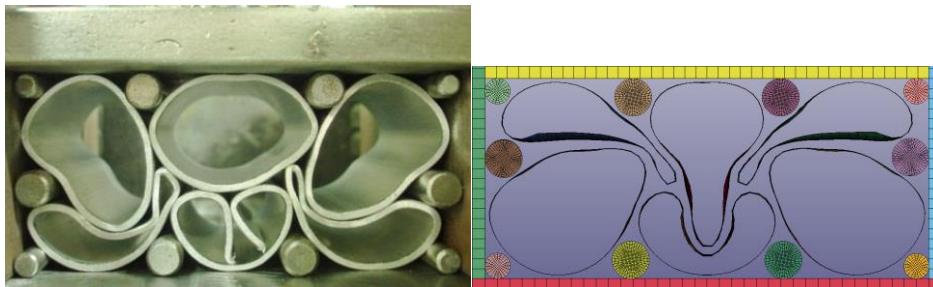
Θέση 3(13mm):



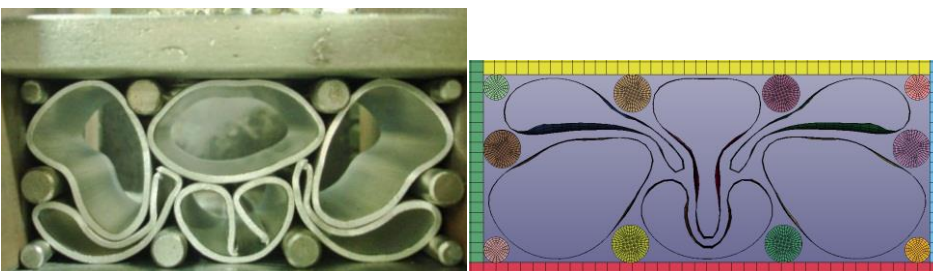
Θέση 4(15,9mm):



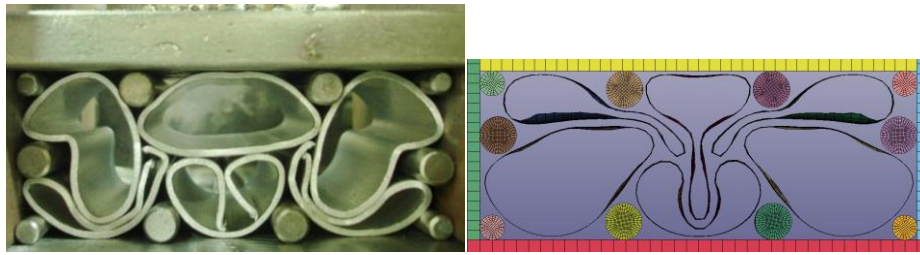
Θέση 5(20,1mm):



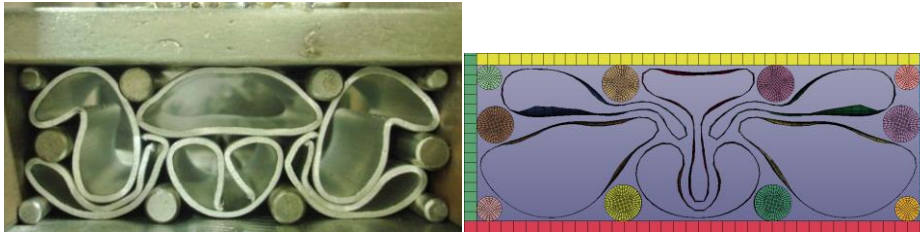
Θέση 6(22,7mm):



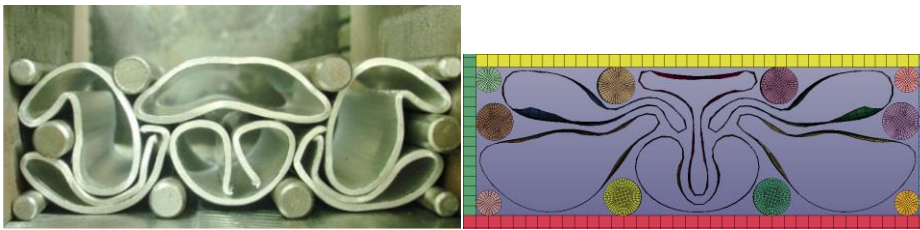
Θέση 7(25,6mm):



Θέση 8(28,2mm):



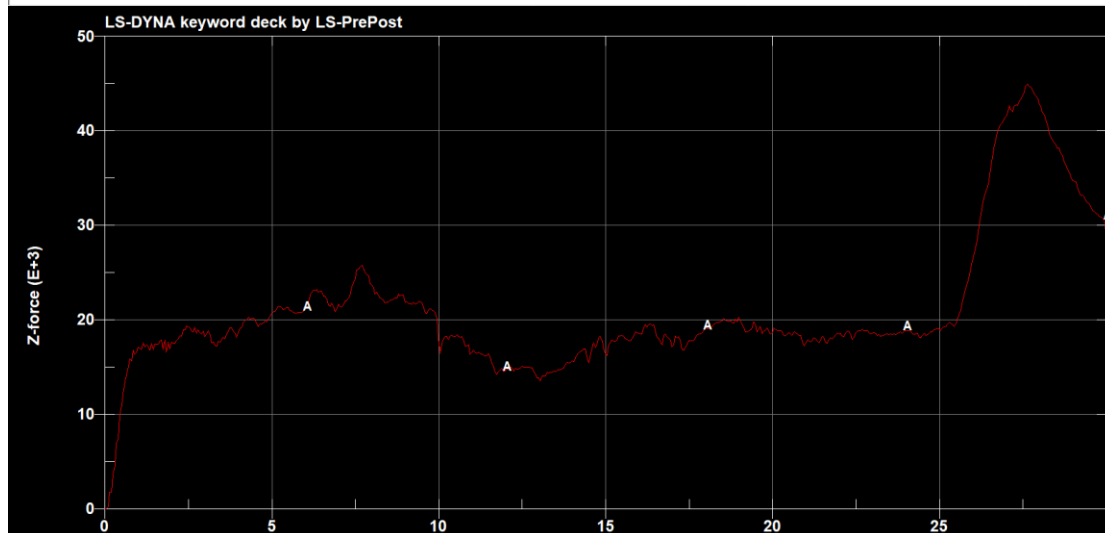
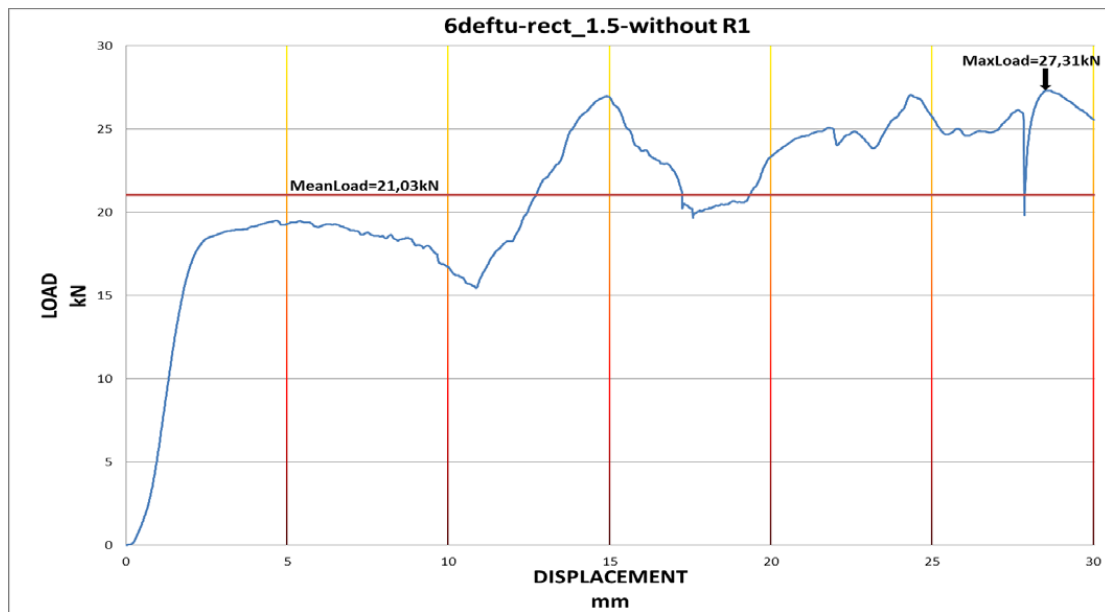
Θέση 9(30mm):



Πίνακας δεδομένων και σύγκρισης:

	$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\max}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
Πειράματος	30	21,0	27,31	0,77	630,9
Μοντέλου	30	21,0	45,04	0,47	630,1

Σύγκριση διαγραμμάτων Φορτίου -Μετατόπισης:



Σχόλια και σύγκριση πειράματος και προσομοίωσης:

Η μη χρήση των κεντρικών απαραμόρφωτων παρεμβλημάτων και η αύξηση του πάχους των δοκιμίων από 1,0mm σε 1,5mm οδηγεί σε μεγαλύτερο αρχικό φορτίο πλαστικής παραμόρφωσης και σε σταθεροποίηση του γύρω από το μέσο φορτίο.

Στις θέσεις 1, 2,3 & 4 φαίνεται η ομοιομορφία με την οποία συμπιέζεται η διάταξη. Η μεγάλη καμπυλότητα που δημιουργείται στο κεντρικό κάτω δοκίμιο, καταλήγει τελικά σε θραύση του ακριβώς στην πλαστική άρθρωση κοντά στα 17mm μετατόπιση εμβόλου.

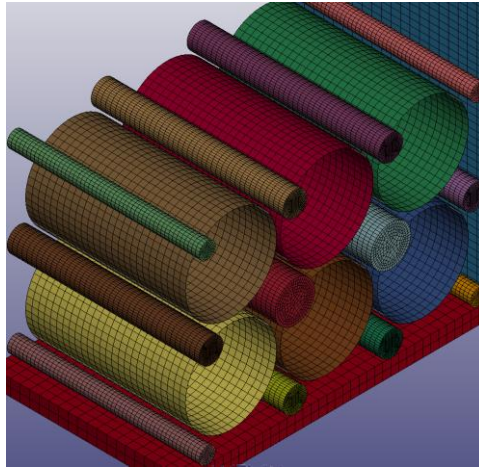
Ταυτόχρονα βλέπουμε την σταδιακή κατάρρευση του υλικού στα εκατέρωθεν του δοκίμια (θέσεις 5 & 6), ενώ η ταυτόχρονη αποκοπή υλικού στα επάνω πλαϊνά δοκίμια που μπορεί να παρατηρηθεί στη θέση 8, είναι ο λόγος της μεγάλης κατακόρυφης πτώσης της καμπύλης στα 28mm μετατόπισης.

Το αυξημένο πάχος των δοκιμίων δεν επιτρέπει στα παρεμβλήματα να μετακινηθούν εκτός των αρχικών τους θέσεων και έτσι το τελικό προφίλ είναι πολύ συμμετρικό.

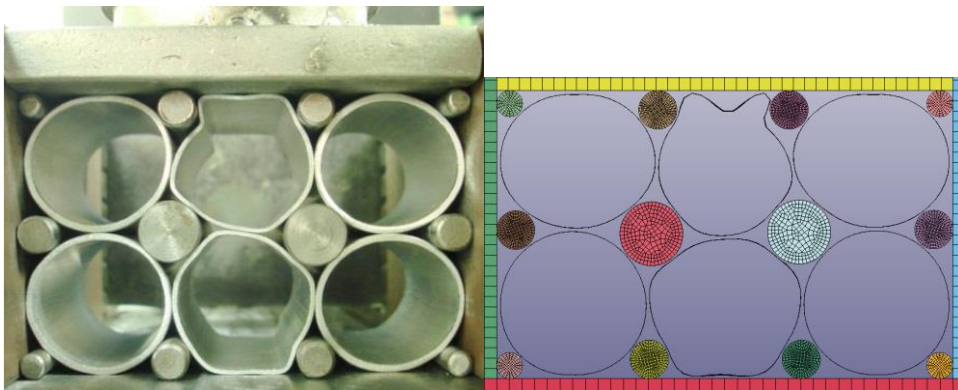
Οι διαφορές στα διαγράμματα οφείλονται στην έλλειψη του στοιχείου της θραύσης στη προσομοίωση, δίνοντας μεν κοντινά δεδομένα και εικόνα της παραμόρφωσης, αλλά αρκετά μεγαλύτερο P_{max} , με αποτέλεσμα και χαμηλότερο CFE.

6.3.11.rect-15/10/15-wi (Ορθογωνική διάταξη πάχους 1,5mm/1,0mm/1,5mm με παρεμβλήματα)

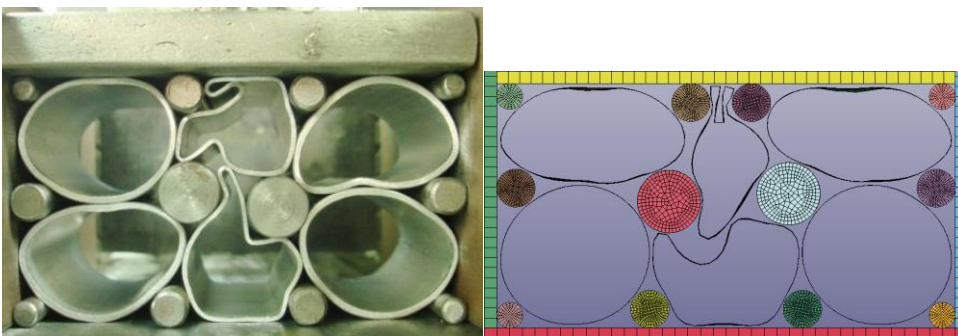
Iso όψη της προσομοίωσης:



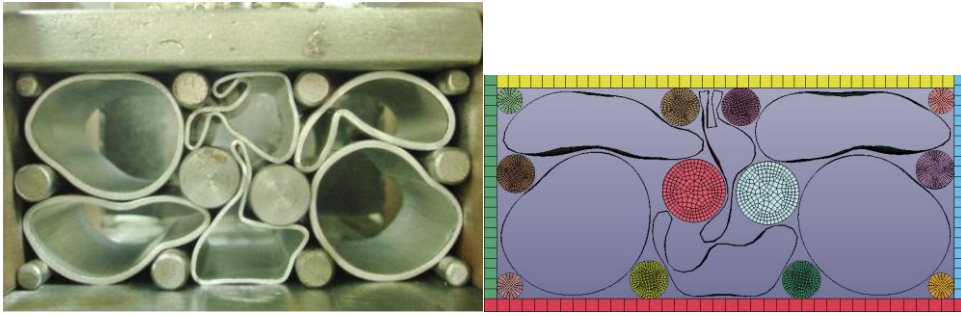
Θέση 1(4mm):



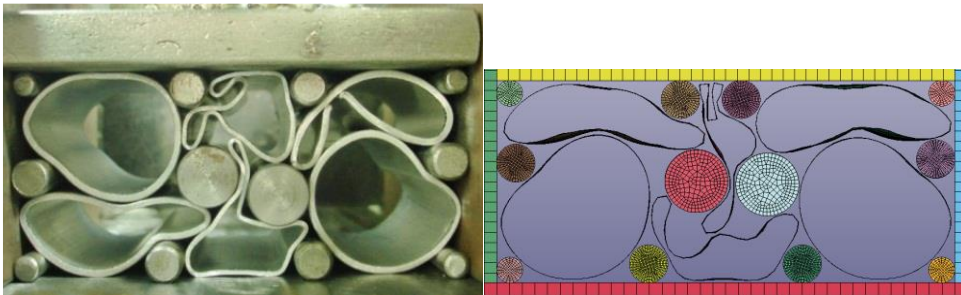
Θέση 2(11,4mm):



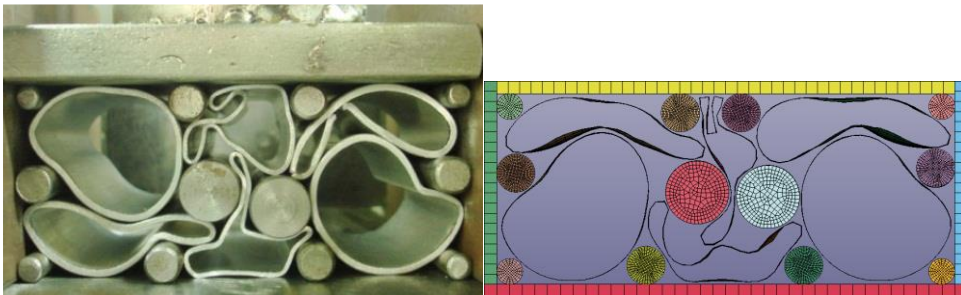
Θέση 3(18,3mm):



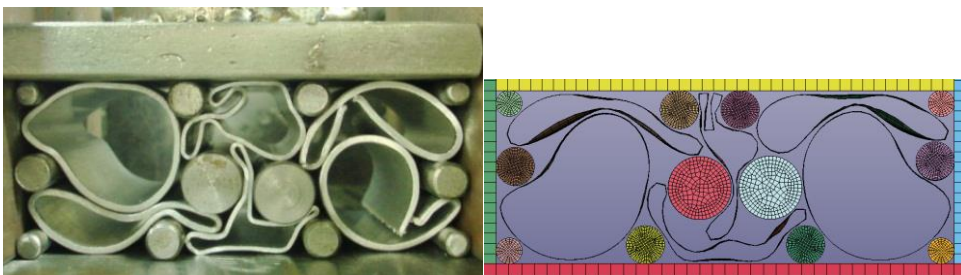
Θέση 4(19,8mm):



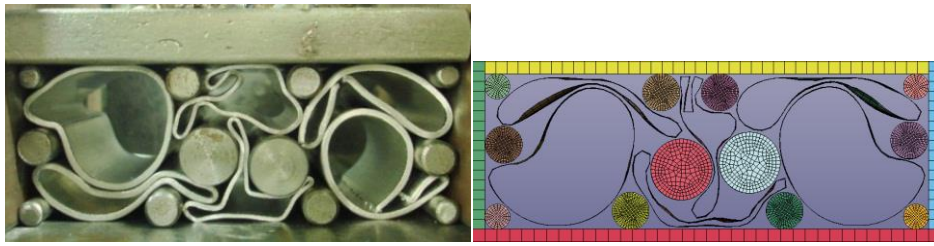
Θέση 5(22,3mm):



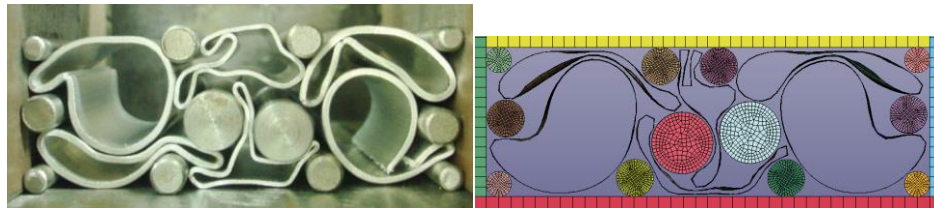
Θέση 6(26,2mm):



Θέση 7(28,4mm):



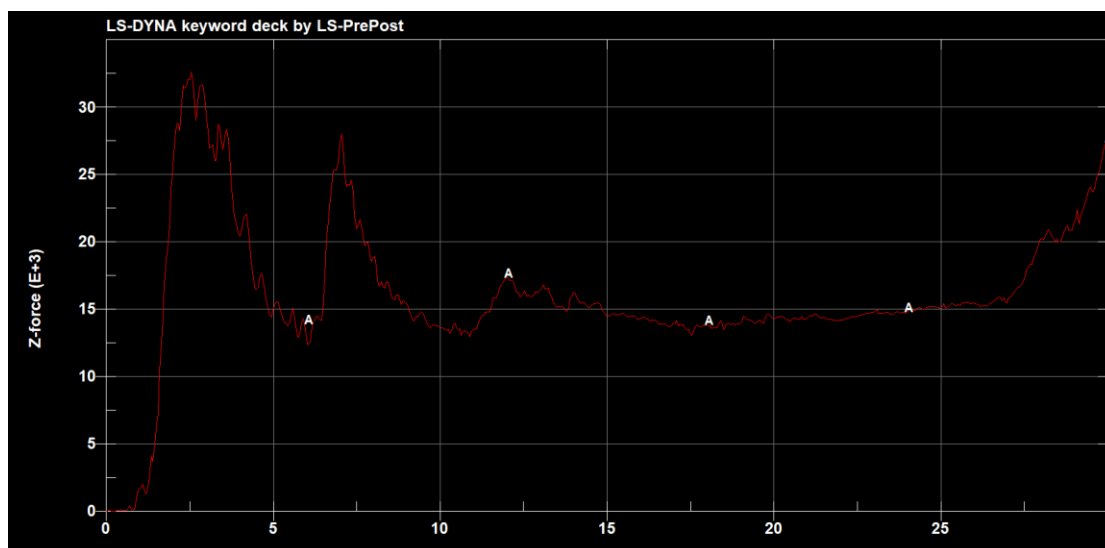
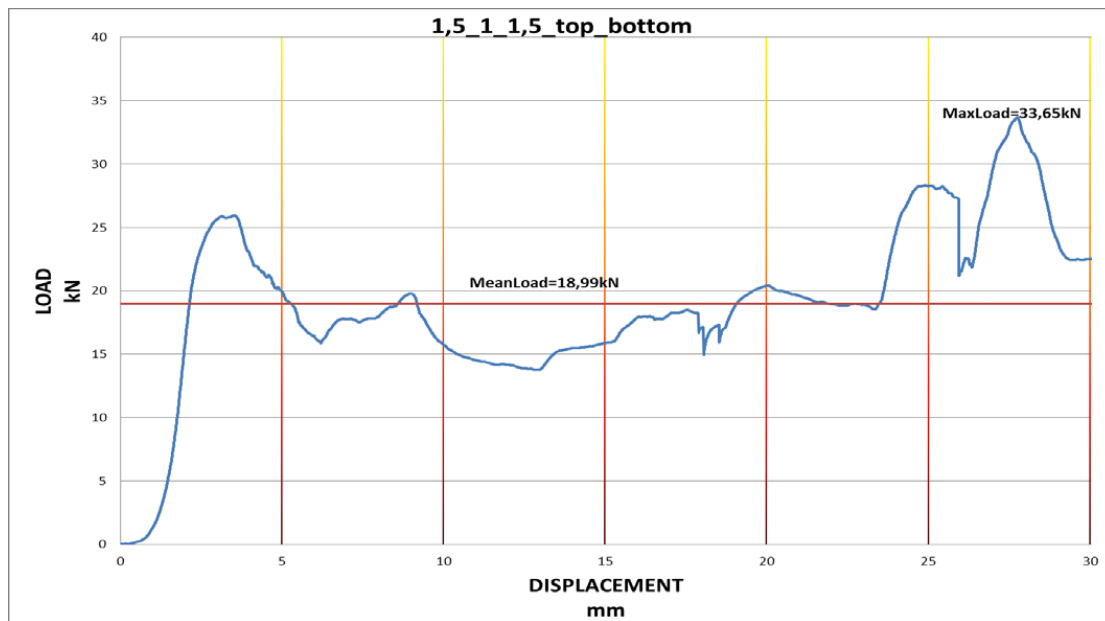
Θέση 8(30mm):



Πίνακας δεδομένων και σύγκρισης:

	$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\max}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
Πειράματος	30	18,99	33,65	0,54	569,7
Μοντέλου	30	16,09	33,05	0,49	482,6

Σύγκριση διαγραμμάτων Φορτίου -Μετατόπισης:



Σχόλια και σύγκριση πειράματος και προσομοίωσης:

Στα 4.0mm μετατόπισης εμβόλου και στην αντίστοιχη φωτογραφία, παρατηρείται η αρχική πρώτη μεγάλη αύξηση φορτίου, ταυτόχρονα με την δημιουργία των πλαστικών αρθρώσεων. Τα δοκίμια με πάχος 1,0mm φαίνεται να καταπονούνται πολύ περισσότερο. Από εκεί και μέχρι τα 17,0mm η καμπύλη ακολουθεί με μικρές διακυμάνσεις την μέση τιμή του φορτίου.

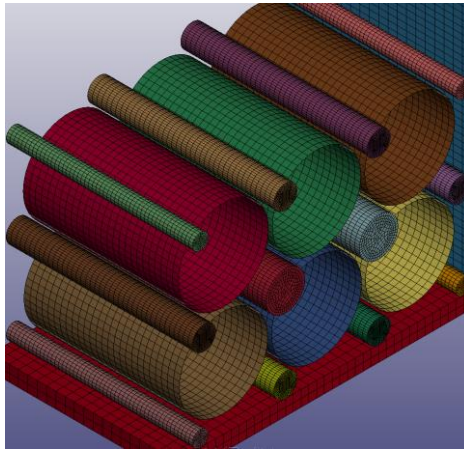
Μετά και όπως βλέπουμε στη θέση τρία φαίνεται η θραύση του πάνω δεξιά δοκιμίου, που έχει δημιουργήσει μεγάλη καμπυλότητα και απεικονίζεται από τις μικρές κατακόρυφες πτώσεις στο διάγραμμα. Στη συνέχεια και στη θέση 6 έχουμε την δεύτερη μεγάλη διάτμηση δοκιμίου, κάτω δεξιά.

Τέλος, η με μεγάλη κλίση αλλά όχι κατακόρυφη πτώση της καμπύλης οφείλεται στην μερική θραύση του επάνω αριστερά δοκιμίου.

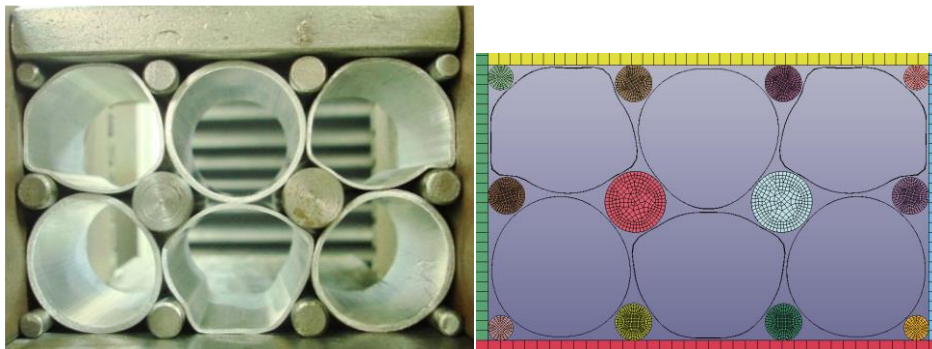
Στην αντίστοιχη προσομοίωση η πρώτη αύξηση είναι αρκετά μεγαλύτερη αφού δεν υπάρχει θραύση του δοκιμίου, ενώ και για τον ίδιο λόγο δεν υπάρχει και η μείωση στο τέλος.

6.3.12.rect-10/15/10/15/10/15-wi (Ορθογωνική διάταξη πάχους 1,0mm/1,5mm/1,0mm επάνω και 1,5mm/1,0mm/1,5mm κάτω με παρεμβλήματα)

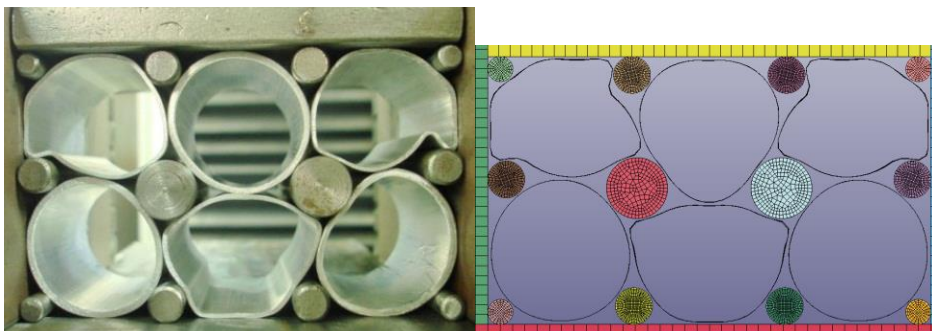
Iso όψη της προσομοίωσης:



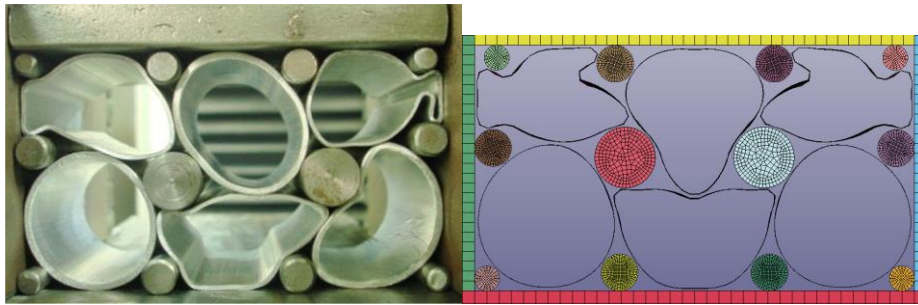
Θέση 1(4,2mm):



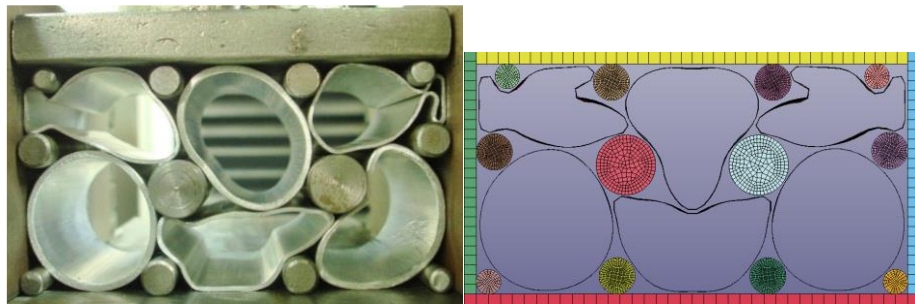
Θέση 2(5,6mm):



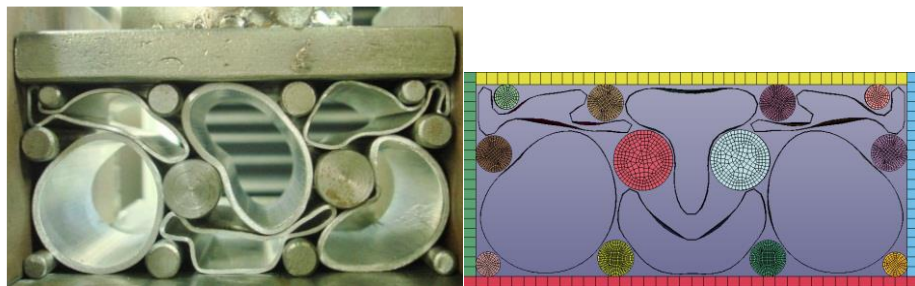
Θέση 3(10,1mm):



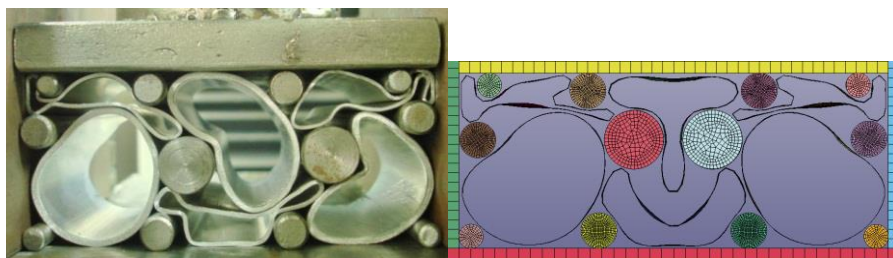
Θέση 4(12,6mm):



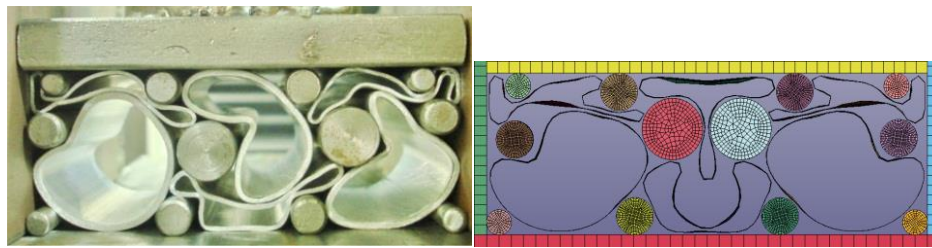
Θέση 5(20,3mm):



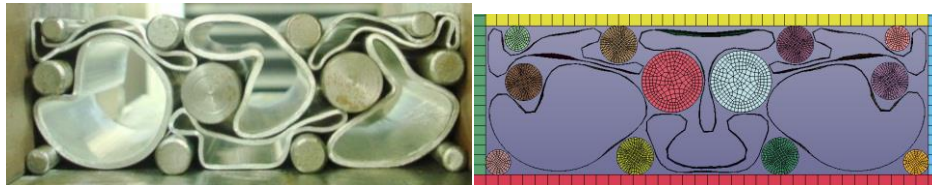
Θέση 6(23mm):



Θέση 7(27,3mm):



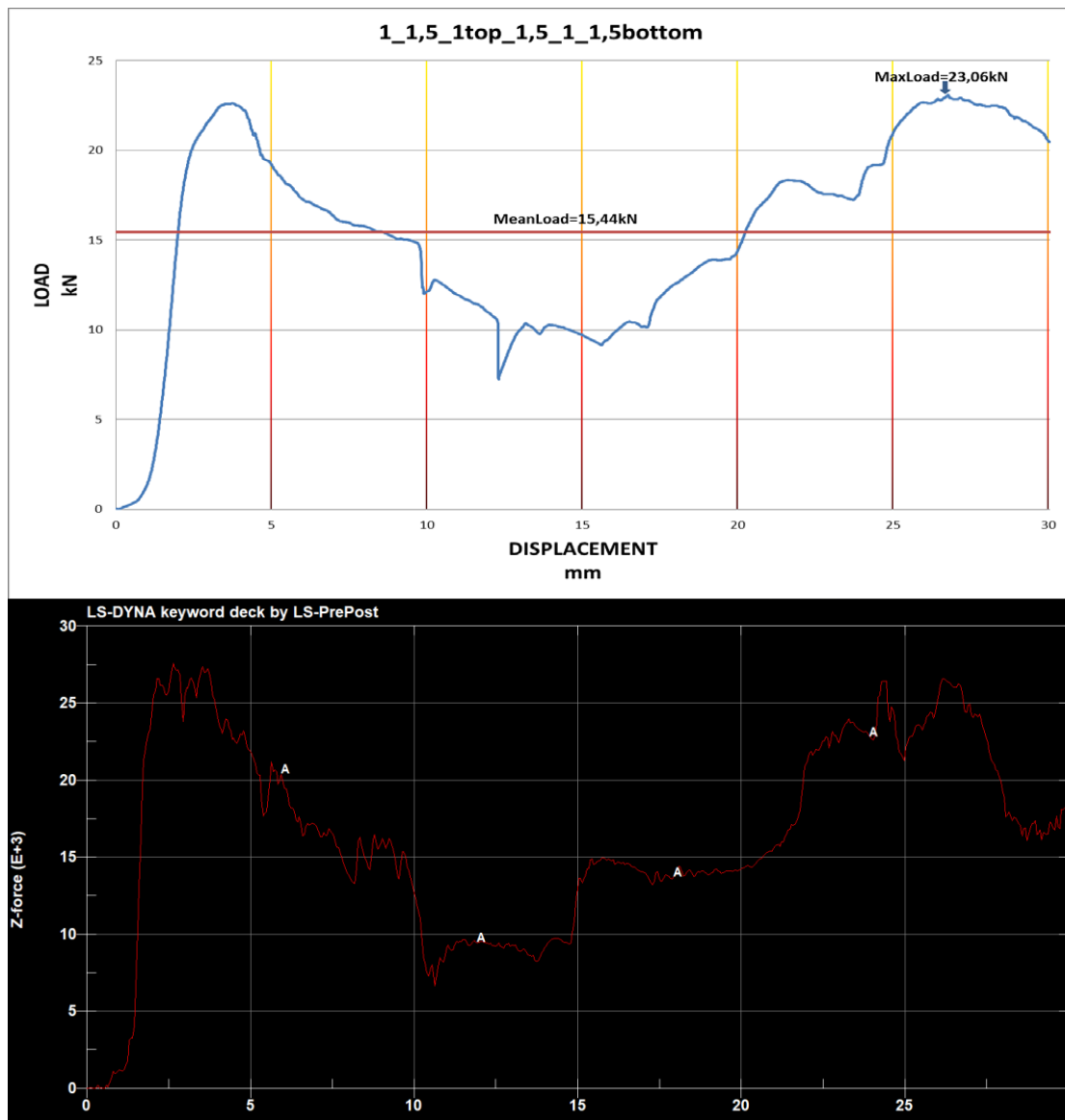
Θέση 8(30mm):



Πίνακας δεδομένων και σύγκρισης:

	$S_{max}(mm)$	$P_{mean}(kN)$	$P_{max}(kN)$	CFE	$E_{abs}(J)$
Πειράματος	30	15,44	23,06	0,67	463,2
Μοντέλου	30	16,50	27,51	0,60	495,1

Σύγκριση διαγραμμάτων Φορτίου -Μετατόπισης:



Σχόλια και σύγκριση πειράματος και προσομοίωσης:

Στη θέση 1 βλέπουμε ομαλή υποχώρηση του υλικού και την δημιουργία των πλαστικών αρθρώσεων. Τα δοκίμια με πάχος 1.0mm καταπονούνται και παραμορφώνονται περισσότερο.

Στη θέση 3 βλέπουμε μία πρώτη απότομη πτώση της καμπύλης λόγω της μεγάλης καμπυλότητας που έχει δημιουργηθεί στο πάνω δεξιά δοκίμιο. Το ίδιο συμβαίνει και στο σημείο 4 για το επάνω αριστερά. Δεν υπάρχει όμως θραύση εξαιτίας της μικρής εφελκυστικής τάσης των λεπτότερων δοκιμίων.

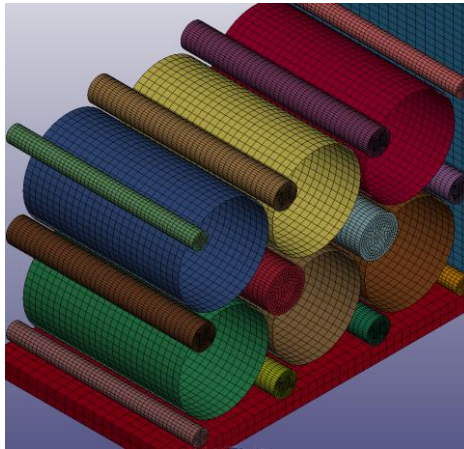
Τα δοκίμια βρίσκονται σε συνεχώς αυξανόμενη επαφή και γι' αυτό παρατηρείται η αύξηση του φορτίου ταυτόχρονα με την δημιουργία και μεγαλύτερων καμπυλών στις ήδη υπάρχουσες αρθρώσεις. Η επαφή των εσωτερικών επιφανειών ιδίων δοκιμίων οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση του φορτίου.

Η τελική πτώση οφείλεται στην δημιουργία αποκοπής στο μεσαίο επάνω δοκίμιο πάχους 1,5mm που ξεπερνάει το όριο θραύσης του.

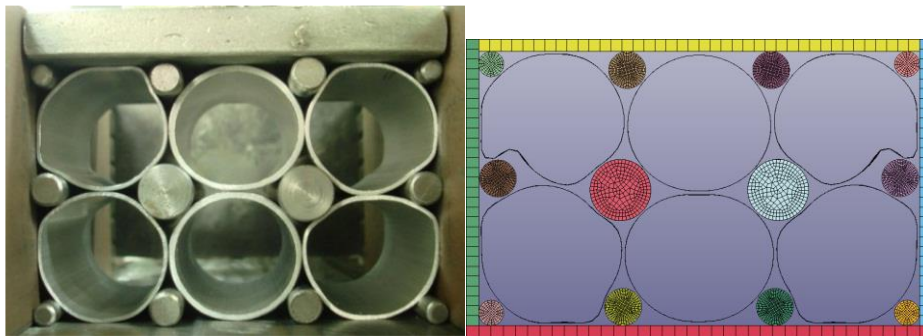
Παρατηρούμε ότι η παραμόρφωση των δοκιμίων στη μοντελοποίηση δε μοιάζει με αυτή του πειράματος, ιδιαίτερα στα κεντρικά δοκίμια όμως το διάγραμμα της μοντελοποίησης είναι παρόμοιο.

6.3.13.rect-10/15/10-wi (Ορθογωνική διάταξη παχους 1,0mm/1,5mm/1,0mm με παρεμβλήματα)

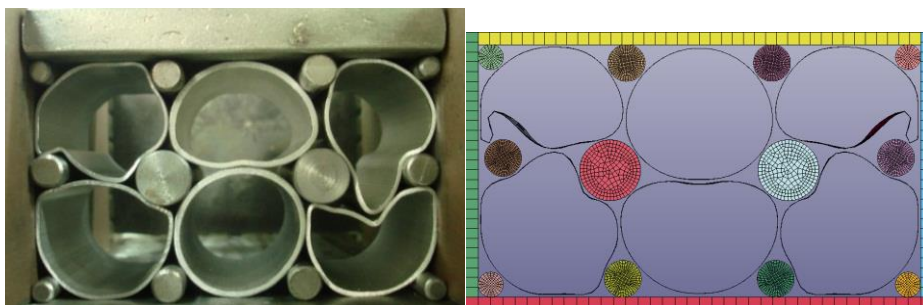
Iso όψη της προσομοίωσης:



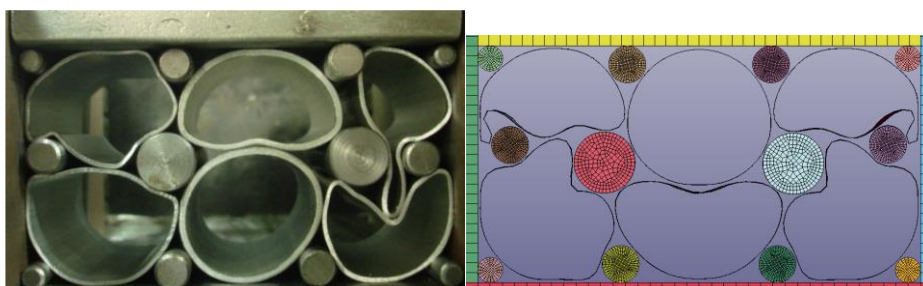
Θέση 1(4,3mm):



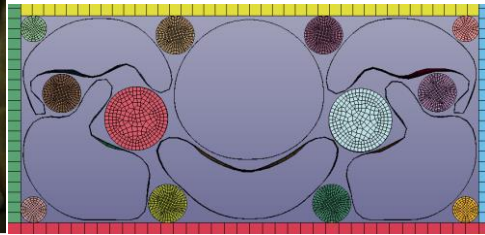
Θέση 2(8,6mm):



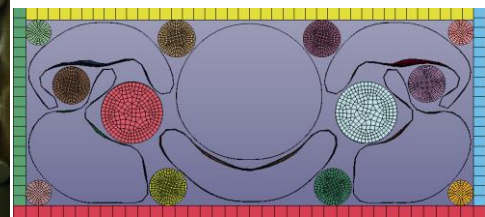
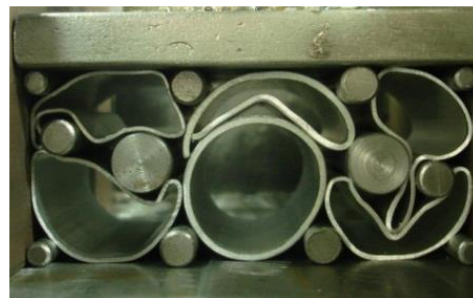
Θέση 3(12,1mm):



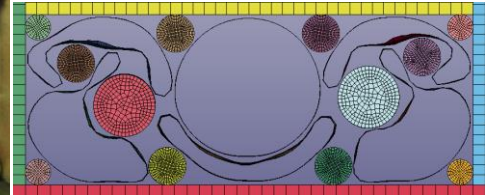
Θέση 4(19,7mm):



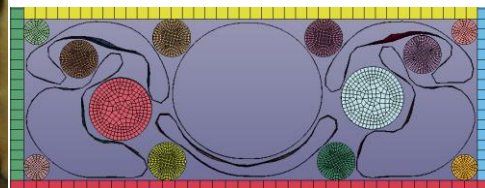
Θέση 5(22,5mm):



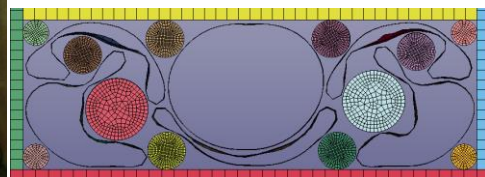
Θέση 6(26,1mm):



Θέση 7(28,2mm):



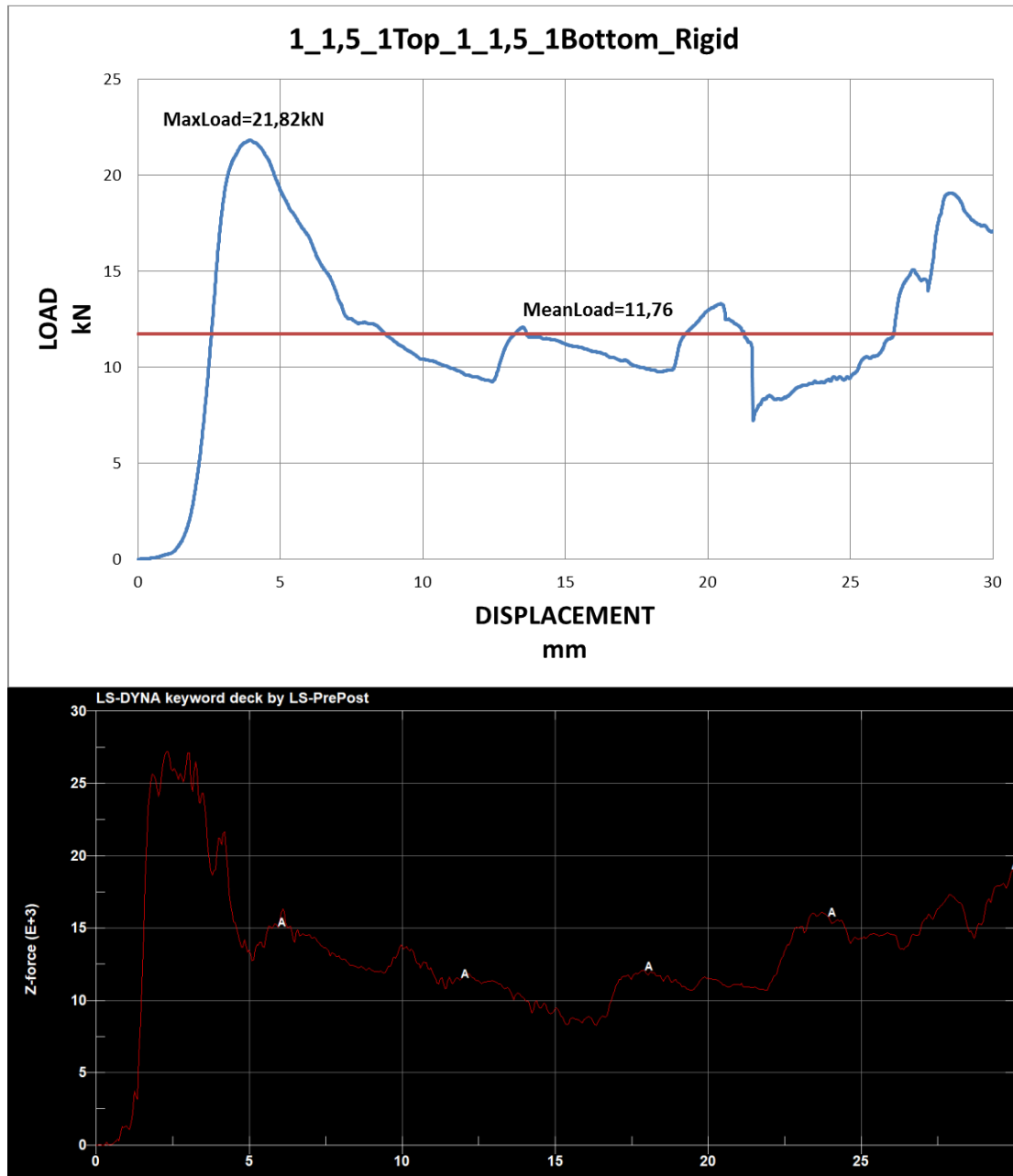
Θέση 8(30mm):



Πίνακας δεδομένων και σύγκρισης:

	$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\max}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
Πειράματος	30	11,76	21,82	0,54	352,8
Μοντέλου	30	13,31	27,12	0,49	399,5

Σύγκριση διαγραμμάτων Φορτίου -Μετατόπισης:



Σχόλια και σύγκριση πειράματος και προσομοίωσης:

Στη θέση 1, φαίνεται ότι τα δοκίμια του 1,0mm είναι αυτά που ξεκινούν να δημιουργούν πλαστικές αρθρώσεις και είναι αυτή η συγχρονισμένη παραμόρφωση τους, που δημιουργεί την απότομη αύξηση του φορτίου.

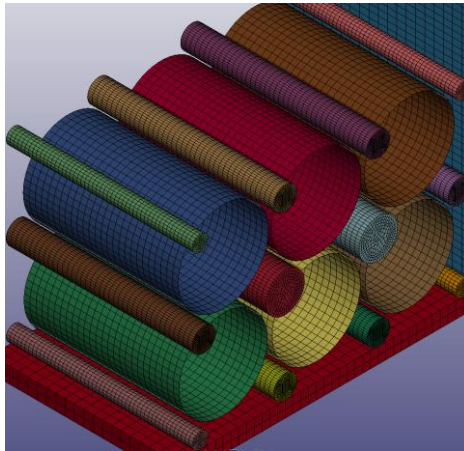
Στις θέσεις 2, 3 και 4 παρατηρούμε την εισχώρηση υλικού από τα πιο λεπτότοιχα δοκίμια ανάμεσα στα κενά που δημιουργούν οι μετακυλήσεις των παρεμβλημάτων. Μετά τα 21mm μετατόπισης εμβόλου, έχουμε την κατακόρυφη πτώση της καμπύλης που οφείλεται στην διαμήκης θραύση του επάνω κεντρικού δοκιμίου.

Τέλος, με την μείωση του όγκου όπου μπορούν τα δοκίμια να μετατοπιστούν, έχουμε την τελευταία αύξηση του φορτίου. Τελικά το προφίλ της διάταξης δεν είναι πολύ συμμετρικό ενώ η παρουσία των κεντρικών παρεμβλημάτων δημιουργεί την αρχική απότομη αύξηση του φορτίου η οποία επιθυμητό θα ήταν να είναι πιο ομαλή.

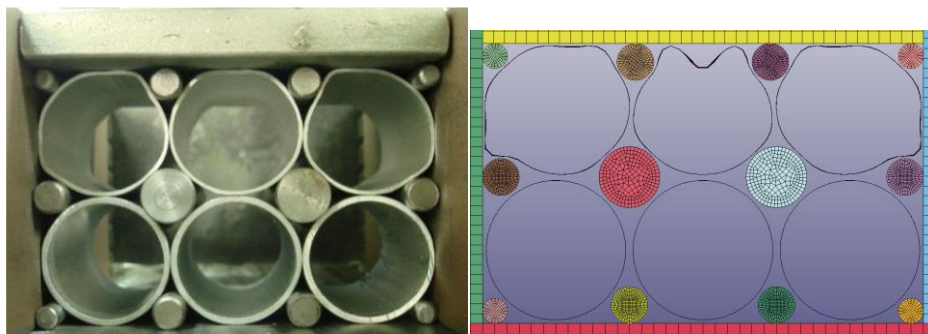
Υπάρχει συμμετρικότητα στη προσομοίωση, ενώ όπως είναι λογικό η ενέργεια απορρόφησης στη είναι μεγαλύτερη.

6.3.14.rect-10/15-wi (Ορθογωνική διάταξη πάχους 1,0mm επάνω και 1,5mm κάτω με παρεμβλήματα)

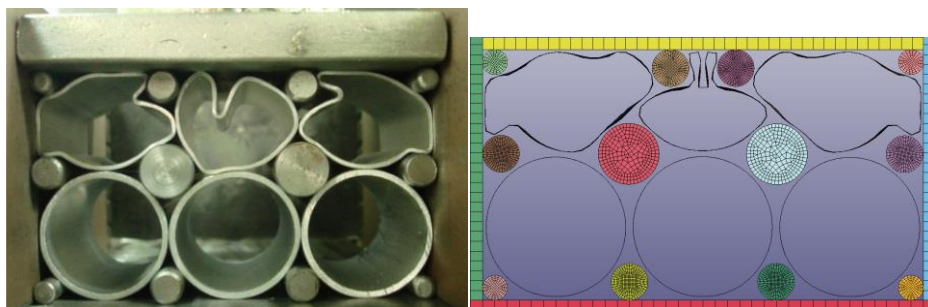
Iso όψη της προσομοίωσης:



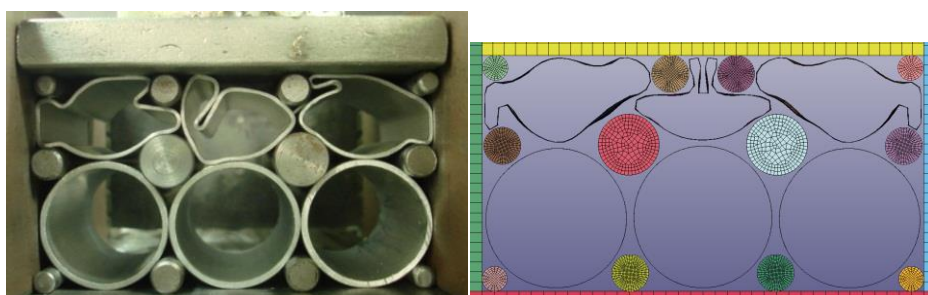
Θέση 1(2,9mm):



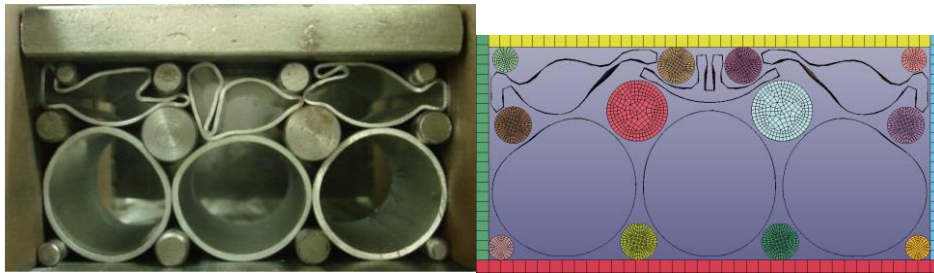
Θέση 2(8,9mm):



Θέση 3(11,9mm):



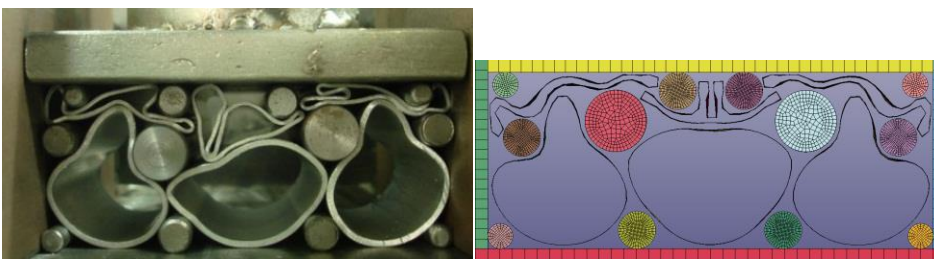
Θέση 4(16,6mm):



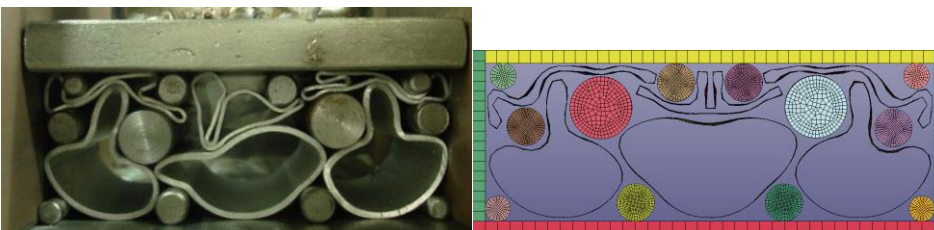
Θέση 5(19,5mm):



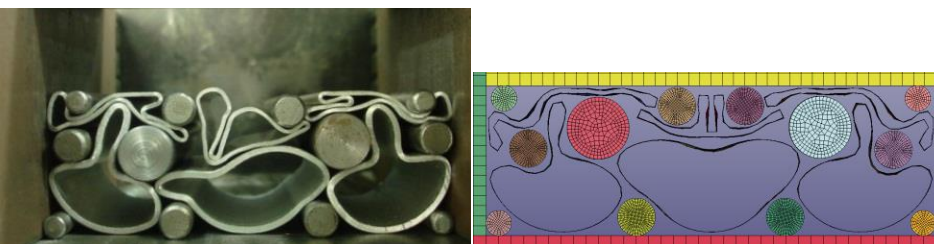
Θέση 6(24,7mm):



Θέση 7(28,6mm):



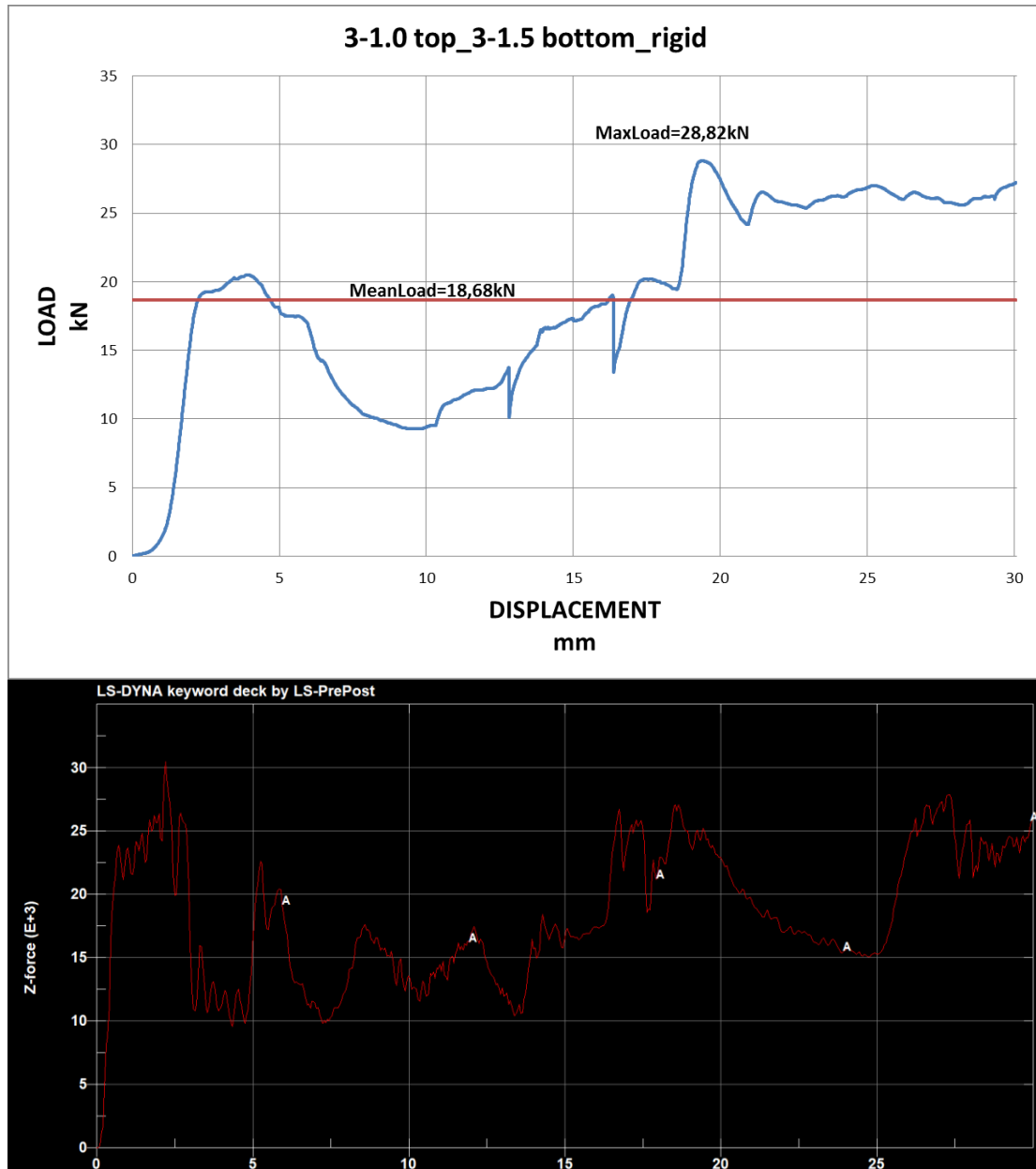
Θέση 8(30mm):



Πίνακας δεδομένων και σύγκρισης:

	$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\max}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
Πειράματος	30	18,68	28,82	0,65	560,4
Μοντέλου	30	18,29	29,16	0,63	548,6

Σύγκριση διαγραμμάτων Φορτίου -Μετατόπισης:



Σχόλια και σύγκριση πειράματος και προσομοίωσης:

Η βασική παρατήρηση που μπορεί να γίνει στο συγκεκριμένο πείραμα, είναι η ομοιομορφία με την οποία τα δοκίμια παραμορφώνονται.

Η παρουσία των δοκιμίων του 1,0mm στην επάνω σειρά κρατάει την δεύτερη πρακτικά απαραμόρφωτη μέχρι περίπου τα 16mm μετατόπισης.

Στις θέσεις 2 και 3 βλέπουμε πόσο μεγάλη καμπυλότητα έχουν αποκτήσει τα πάνω δοκίμια χωρίς να έχουν υποστεί θραύση.

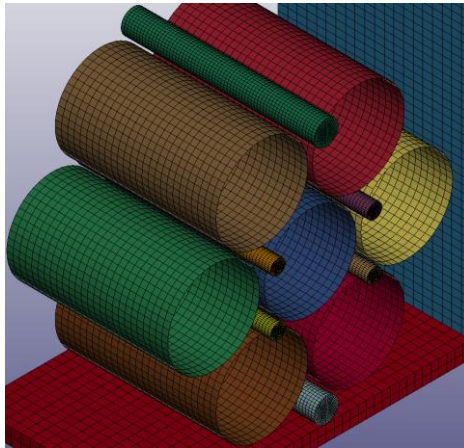
Η κατακόρυφη πτώση που φαίνεται λίγο μετά τα 12,5mm και λίγο μετά τα 16mm οφείλεται στην εισχώρηση παρεμβλημάτων στα δοκίμια και την οριακή μη θραύση τους.

Στις θέσεις 5, 6, 7 & 8 παρατηρούμε την σταθερή μείωση του όγκου της διάταξης και την σταθερή τιμή που κρατάει το φορτίο κρούσης.

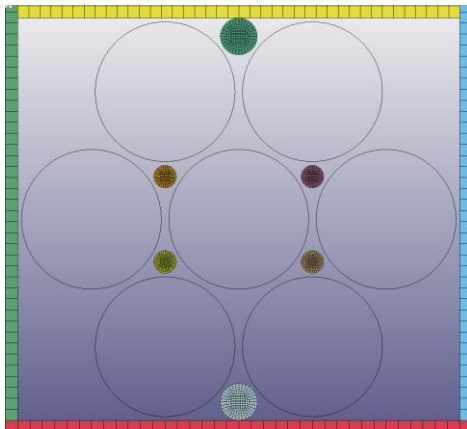
Τα δεδομένα της προσομοίωσης είναι κοντά σε αυτά του πειράματος, με τις διαφορές στο διάγραμμα να οφείλονται στη μη ύπαρξη θραύσης της προσομοίωσης.

6.3.15.par1-15-wi (Παραμετρική διάταξη πάχους 1,5mm με παρεμβλήματα)

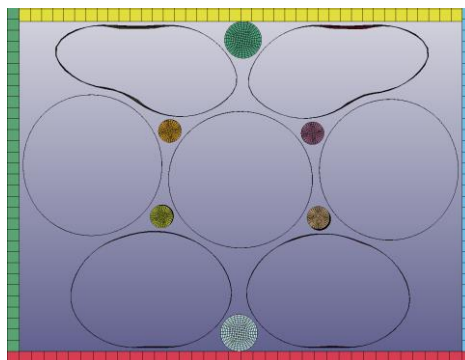
Iso όψη της προσομοίωσης:



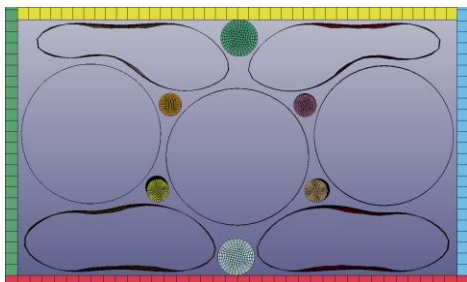
Θέση 1(0mm):



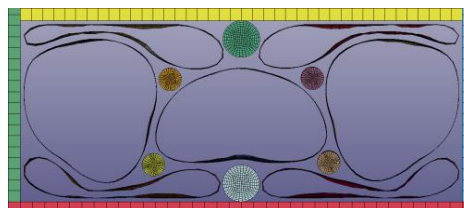
Θέση 2(15mm):



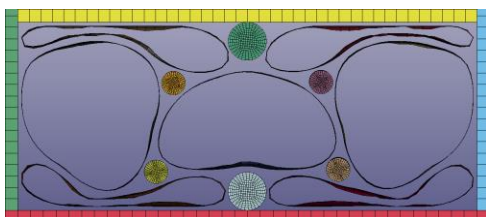
Θέση 3(30mm):



Θέση 4(45mm):



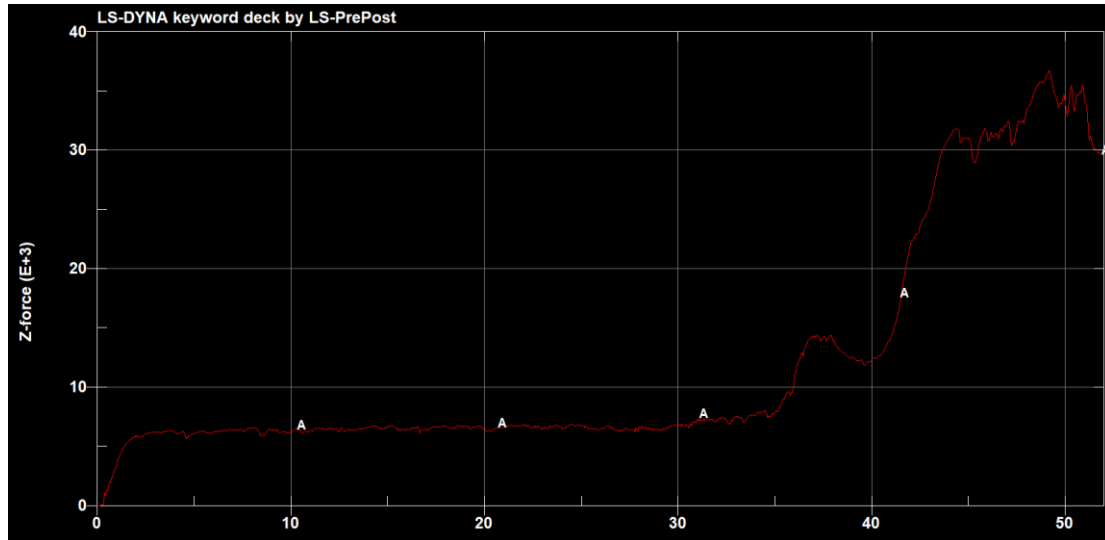
Θέση 5(52mm):



Πίνακας δεδομένων:

	$S_{max}(mm)$	$P_{mean}(kN)$	$P_{max}(kN)$	CFE	$E_{abs}(J)$
Μοντέλου	52	12,08	36,72	0,33	628,17

Διάγραμμα Φορτίου -Μετατόπισης:

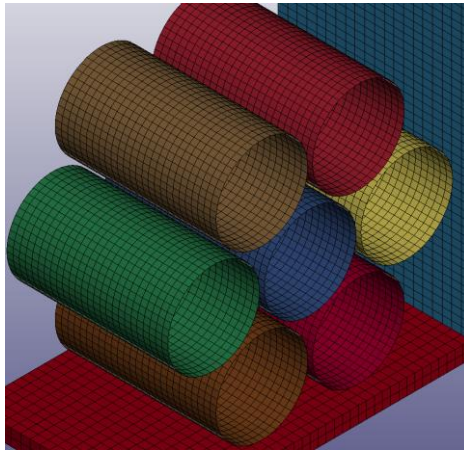


Σχόλια επί της προσομοίωσης:

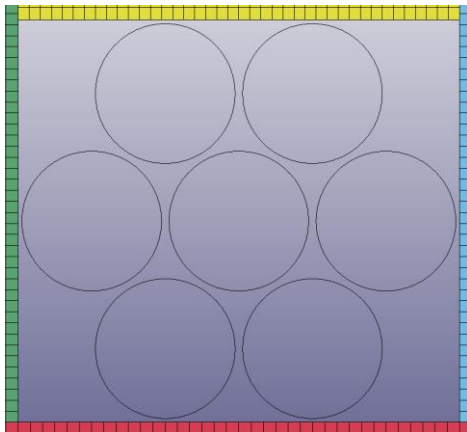
Παρατηρούμε ότι η μεσαία σειρά των δοκιμίων δε παραμορφώνεται ιδιαίτερα. Το μέγιστο φορτίο το έχουμε προς το τέλος της προσομοίωσης, όπου έχουν καλυφθεί οι χώροι. Ο CFE είναι σχετικά χαμηλός, ενώ η ενέργεια απορρόφησης είναι μέτρια.

6.3.16.par1-15-wo (Παραμετρική διάταξη πάχους 1,5mm χωρίς παρεμβλήματα)

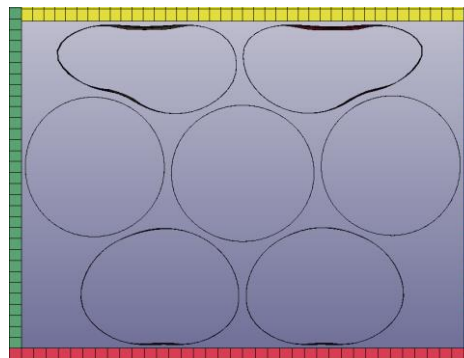
Iso όψη της προσομοίωσης:



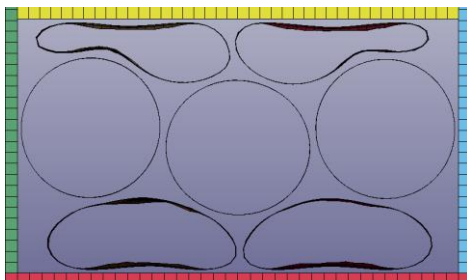
Θέση 1(0mm):



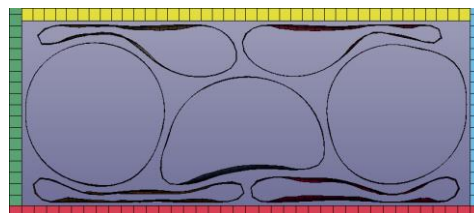
Θέση 2(15mm):



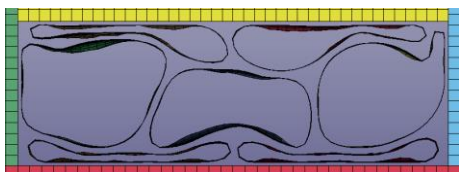
Θέση 3(30mm):



Θέση 4(45mm):



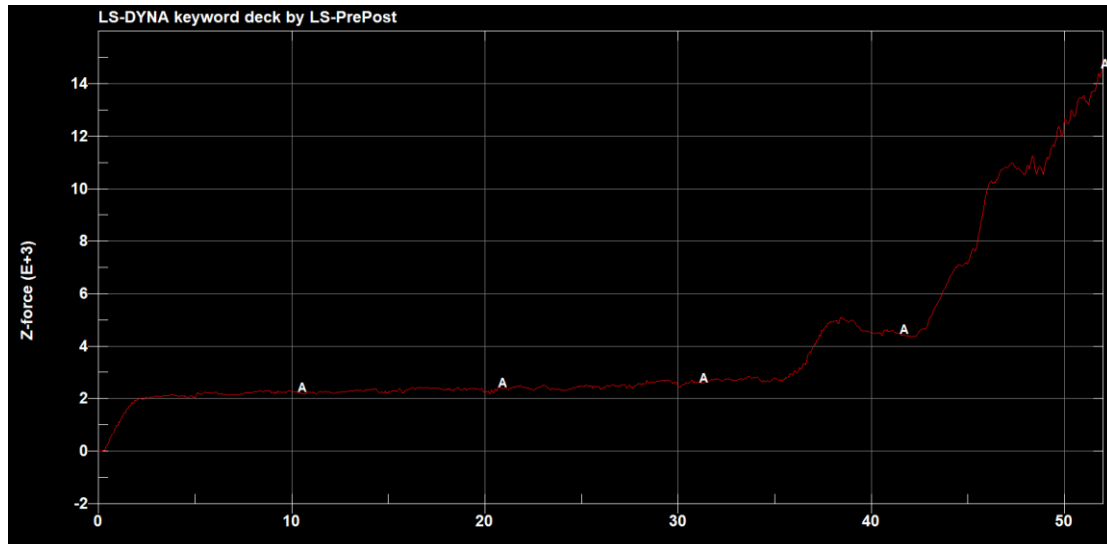
Θέση 5(52mm):



Πίνακας δεδομένων:

	$S_{max}(mm)$	$P_{mean}(kN)$	$P_{max}(kN)$	CFE	$E_{abs}(J)$
Μοντέλου	52	9,73	25,35	0,38	506,2

Διάγραμμα Φορτίου -Μετατόπισης:

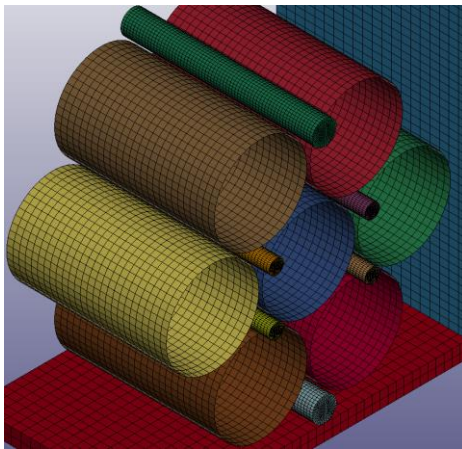


Σχόλια επί της προσομοίωσης:

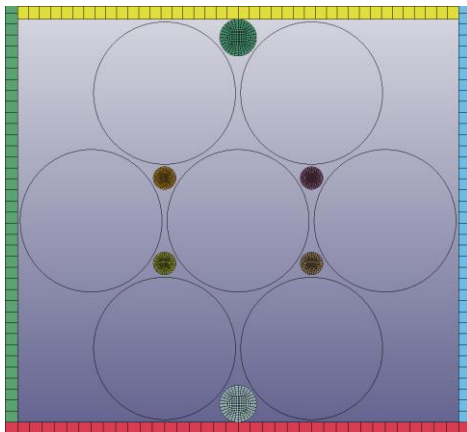
Η συμπεριφορά χωρίς παρεμβλήματα είναι παρόμοια με τη προηγούμενη προσομοίωση, όπως και η εικόνα του διαγράμματος. Το CFE είναι σχεδόν ίδιο, ενώ η ενέργεια απορρόφησης είναι χαμηλότερη, όπως και περιμέναμε να είναι.

6.3.17.par1-10-wi (Παραμετρική διάταξη πάχους 1,0mm με παρεμβλήματα)

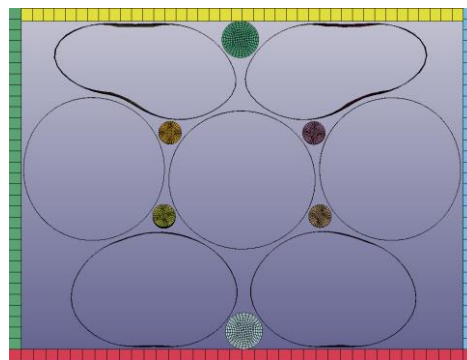
Iso όψη της προσομοίωσης:



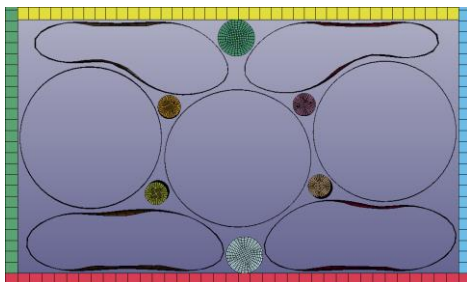
Θέση 1(0mm):



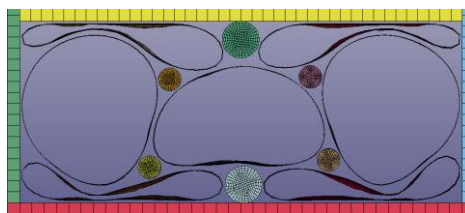
Θέση 2(15mm):



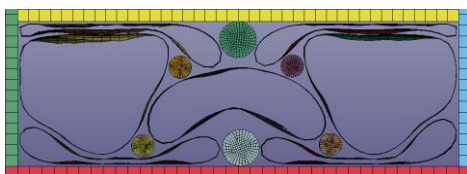
Θέση 3(30mm):



Θέση 4(45mm):



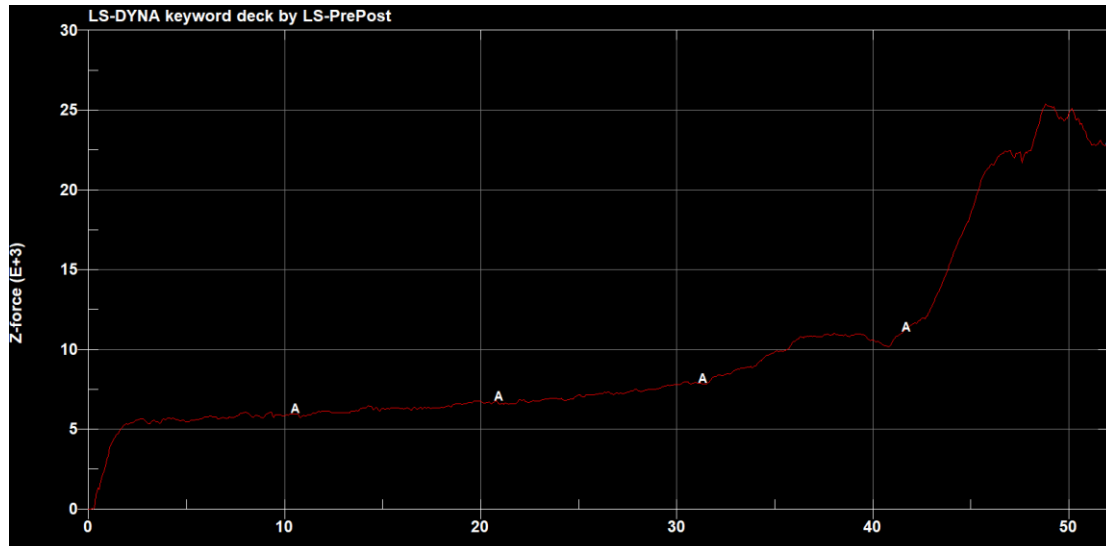
Θέση 5(52mm):



Πίνακας δεδομένων:

	$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\max}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
Μοντέλου	52	3,95	14,73	0,27	205,9

Διάγραμμα Φορτίου -Μετατόπισης:

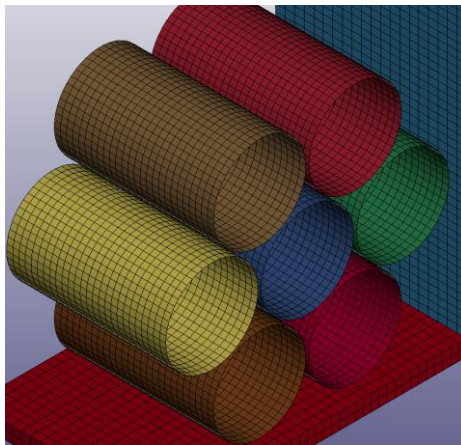


Σχόλια επί της προσομοίωσης:

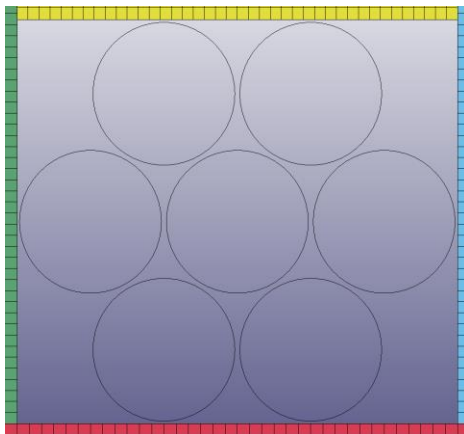
Η μείωση του πάχους των δοκιμίων έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη μείωση στην ενέργεια απορρόφησης, ενώ και πτώση του δείκτη απορρόφησης φορτίου. Τα δεδομένα που λαμβάνουμε για αυτό το πάχος έχουν πολύ χαμηλές τιμές, χαμηλότερες και από απλούστερες διατάξεις που εξετάστηκαν πριν.

6.3.18.par1-10-wo (Παραμετρική διάταξη πάχους 1,0mm χωρίς παρεμβλήματα)

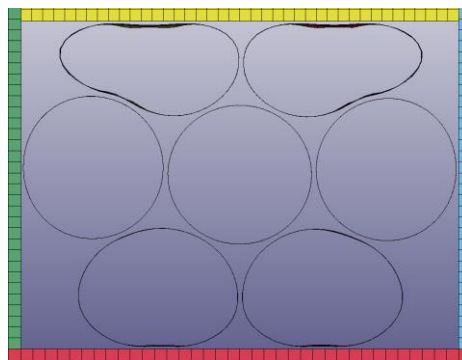
Iso όψη της προσομοίωσης:



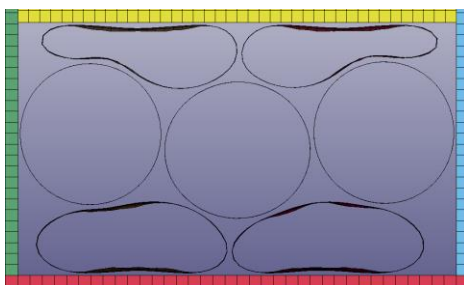
Θέση 1(0mm):



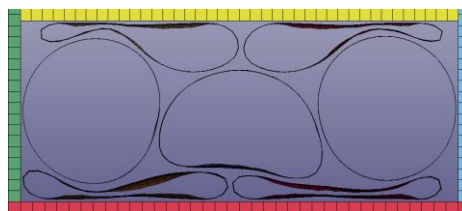
Θέση 2(15mm):



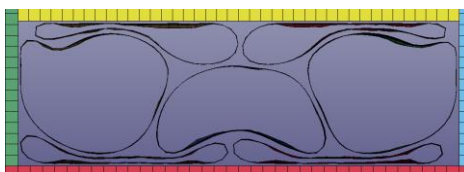
Θέση 3(30mm):



Θέση 4(45mm):



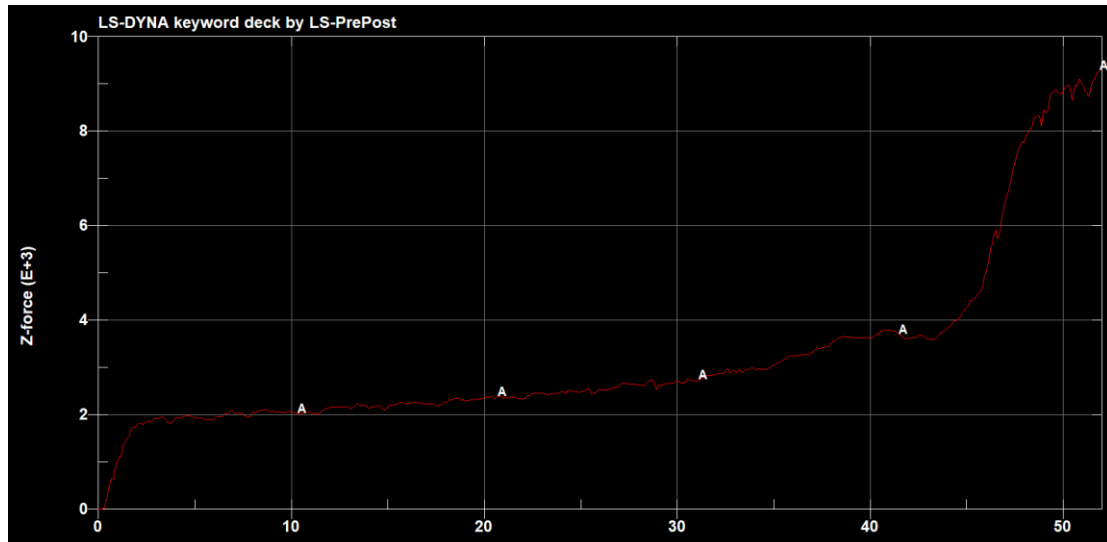
Θέση 5(52mm):



Πίνακας δεδομένων:

	$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\max}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
Μοντέλου	52	3,21	9,29	0,35	167,1

Διάγραμμα Φορτίου -Μετατόπισης:

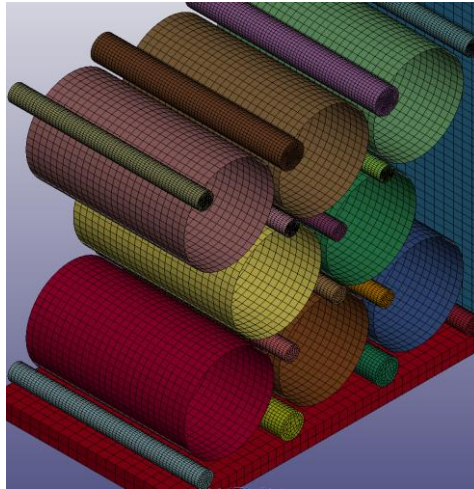


Σχόλια επί της προσομοίωσης:

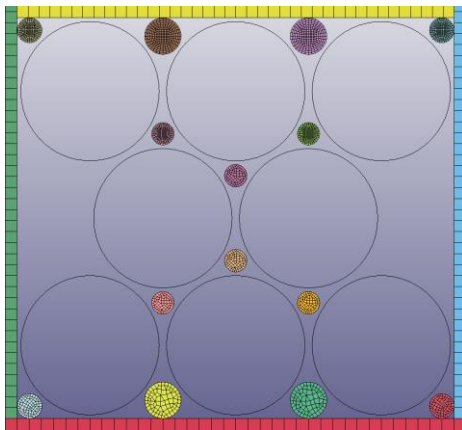
Με την αφαίρεση των παρεμβλημάτων, έχουμε ακόμα χαμηλότερη ενέργεια απορρόφησης. Τα δεδομένα στη συγκεκριμένη προσομοίωση δεν είναι καθόλου ικανοποιητικά.

6.3.19.par2-15-wi (Παραμετρική διάταξη πάχους 1,5mm με παρεμβλήματα)

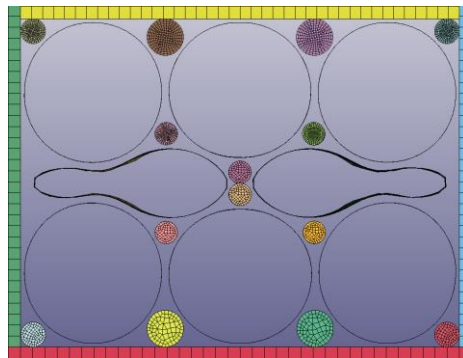
Iso όψη της προσομοίωσης:



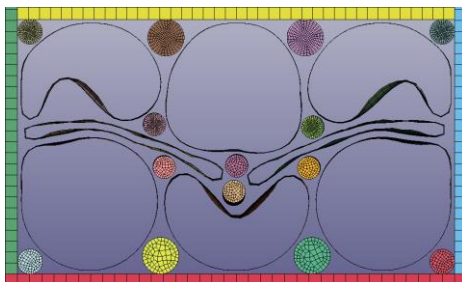
Θέση 1(0mm):



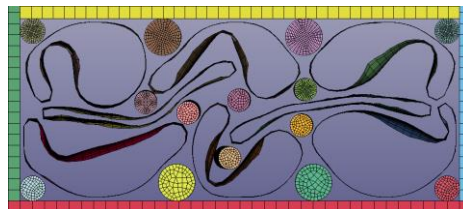
Θέση 2(15mm):



Θέση 3(30mm):



Θέση 4(45mm):



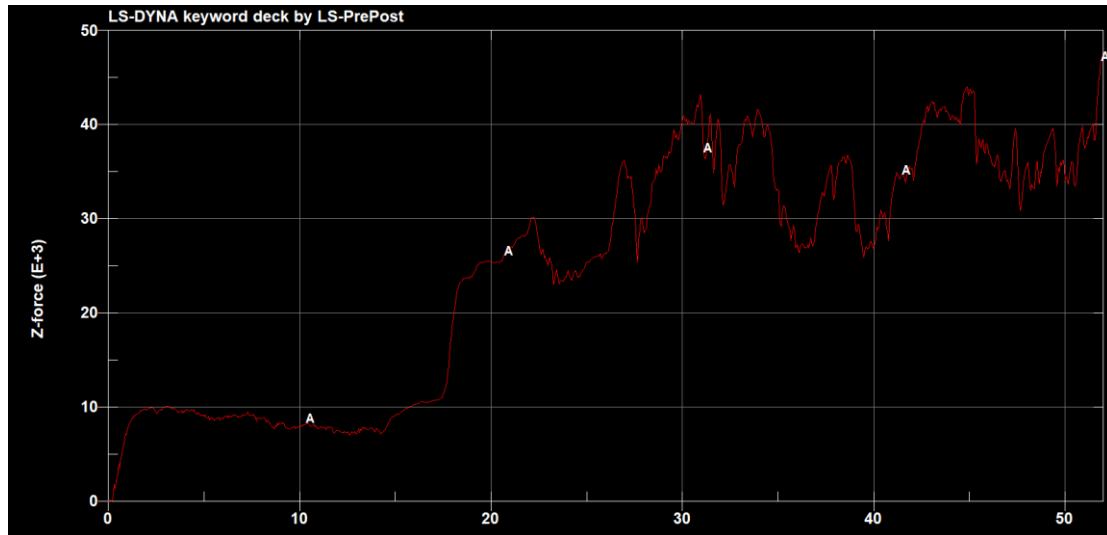
Θέση 5(52mm):



Πίνακας δεδομένων:

	$S_{max}(mm)$	$P_{mean}(kN)$	$P_{max}(kN)$	CFE	$E_{abs}(J)$
Μοντέλου	52	26,49	47,42	0,52	1283,9

Διάγραμμα Φορτίου -Μετατόπισης:

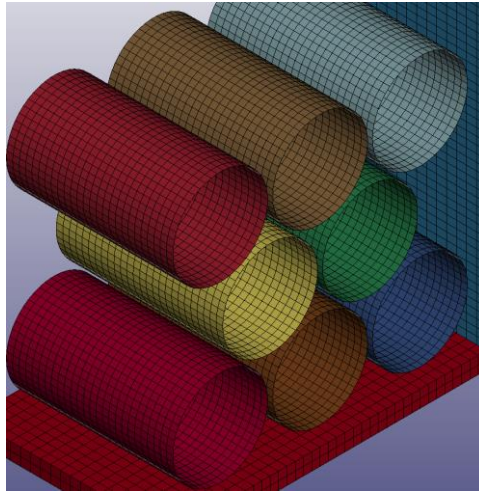


Σχόλια επί της προσομοίωσης:

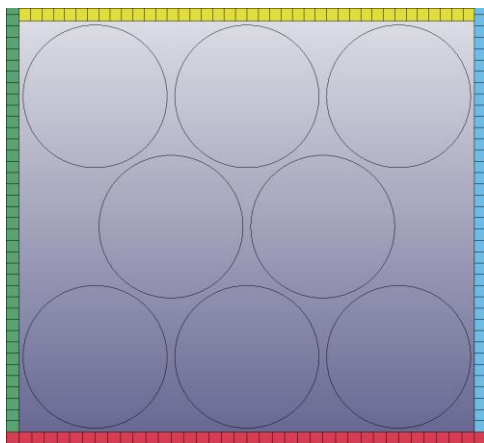
Σε αυτή τη προσομοίωση έχουμε τη μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας και έναν μέτριο δείκτη απορρόφησης φορτίου. Οποτε η συγκεκριμένη διάταξη μπορεί να είναι ικανοποιητική όσο αφορά τα δεδομένα που ζητάμε.

6.3.20.par2-15-wo (Παραμετρική διάταξη πάχους 1,5mm χωρίς παρεμβλήματα)

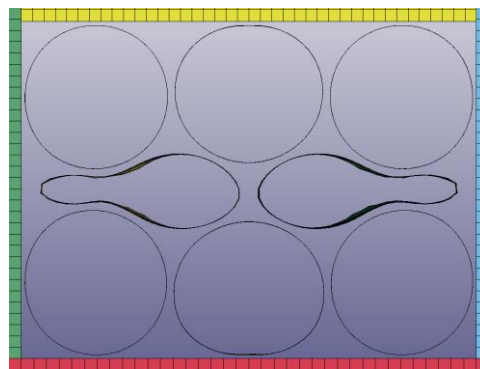
Iso όψη της προσομοίωσης:



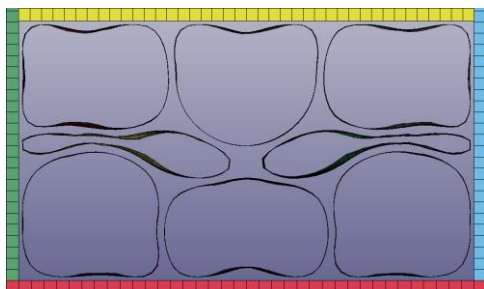
Θέση 1(0mm):



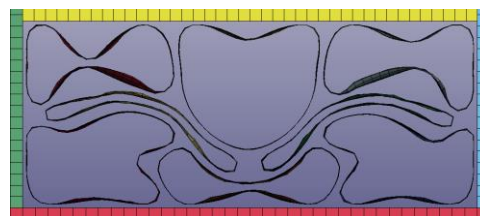
Θέση 2(15mm):



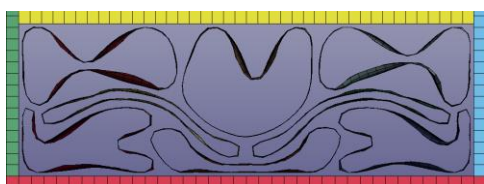
Θέση 3(30mm):



Θέση 4(45mm):



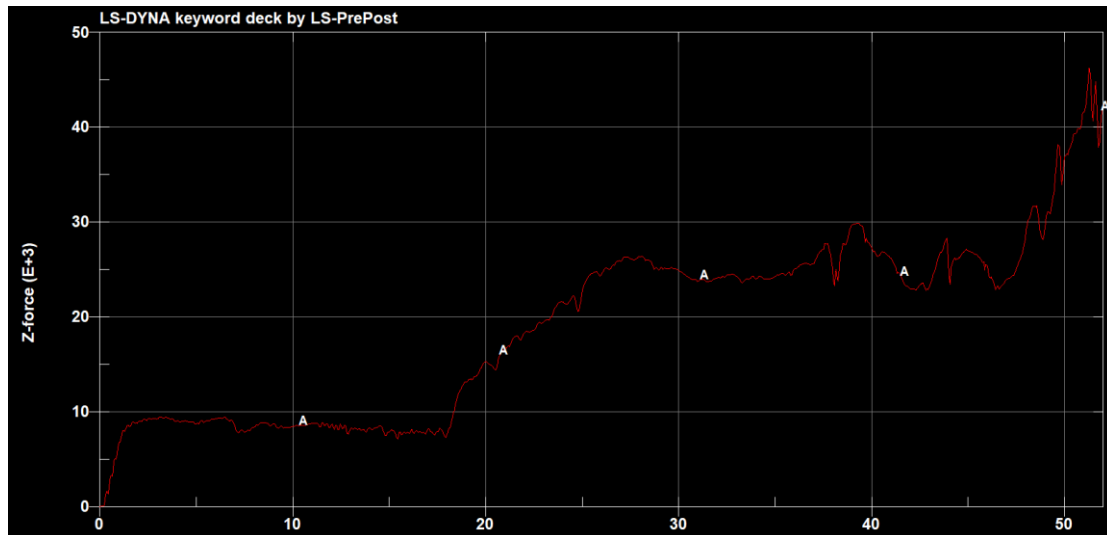
Θέση 5(52mm):



Πίνακας δεδομένων:

	$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\max}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
Μοντέλου	52	19,08	46,07	0,41	992,4

Διάγραμμα Φορτίου -Μετατόπισης:

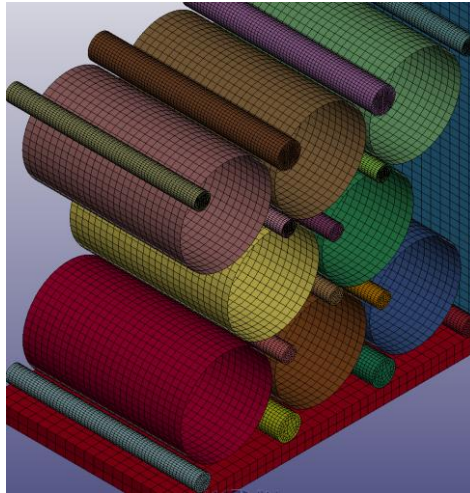


Σχόλια επί της προσομοίωσης:

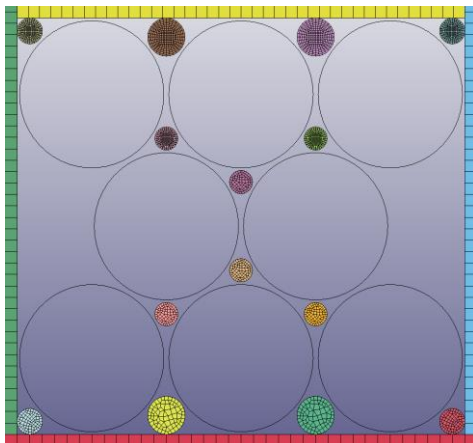
Με την αφαίρεση των παρεμβλημάτων, όπως είναι λογικό έχουμε πτώση των τιμών. Επίσης λόγω της έλλειψης των παρεμβλημάτων έχουμε και διαφορετικό τρόπο παραμόρφωσης των δοκιμίων.

6.3.21.par2-10-wi (Παραμετρική διάταξη πάχους 1,0mm με παρεμβλήματα)

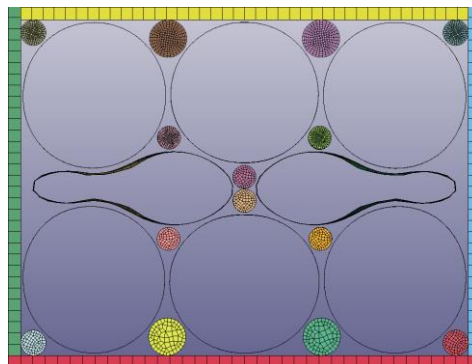
Iso όψη της προσομοίωσης:



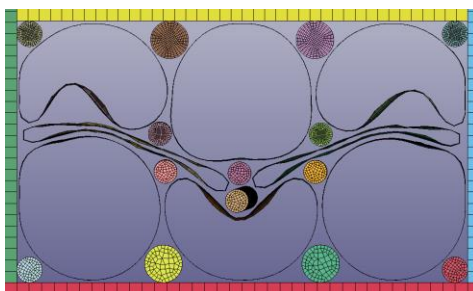
Θέση 1(0mm):



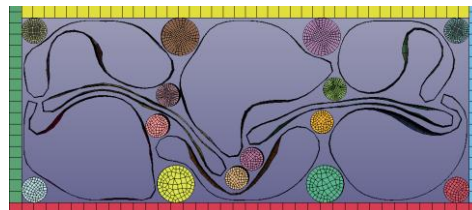
Θέση 2(15mm):



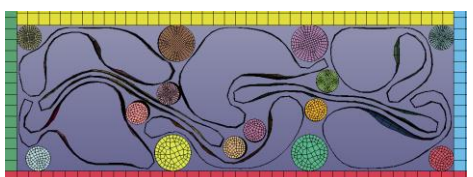
Θέση 3(30mm):



Θέση 4(45mm):



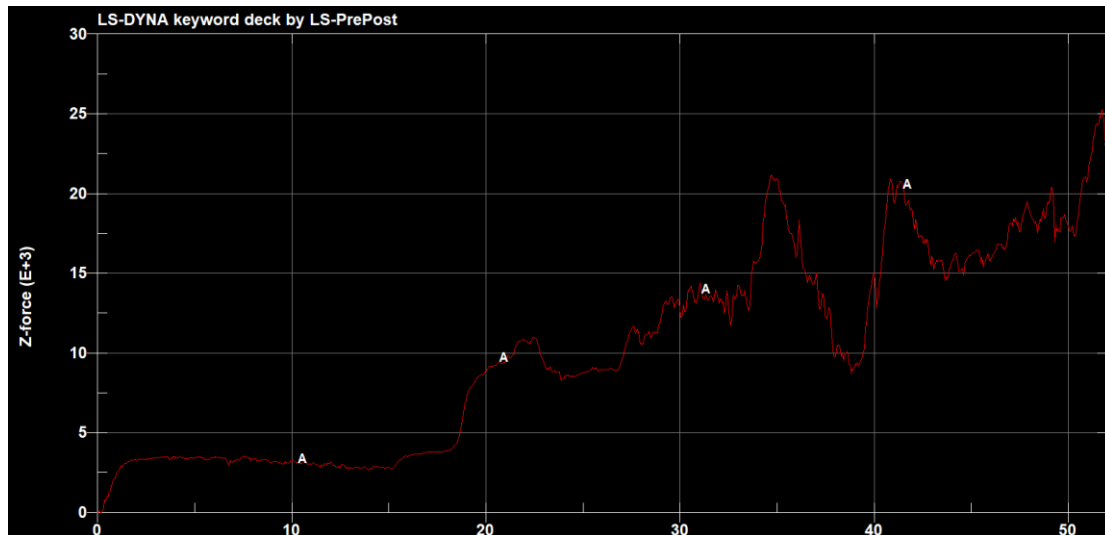
Θέση 5(52mm):



Πίνακας δεδομένων:

	$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\max}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
Μοντέλου	52	10,14	25,64	0,40	527,2

Διάγραμμα Φορτίου -Μετατόπισης:

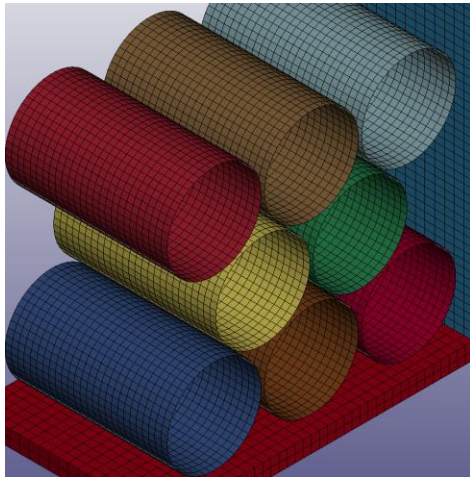


Σχόλια επί της προσομοίωσης:

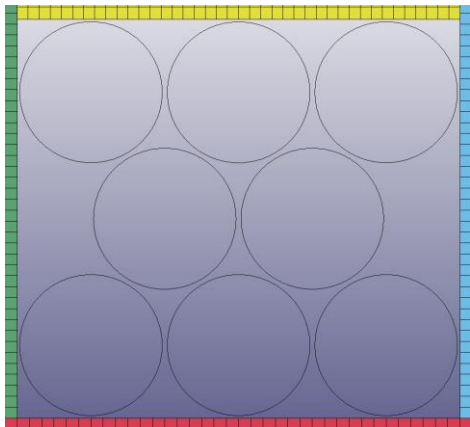
Με τη μείωση του πάχους έχουμε πτώση της ενέργειας απορρόφησης σχεδόν κατά 60%. Η μεγάλη μείωση οφείλεται και στη πτώση του φορτίου στα 39mm της διαδρομής.

6.3.22.par2-10-wo (Παραμετρική διάταξη πάχους 1,0mm χωρίς παρεμβλήματα)

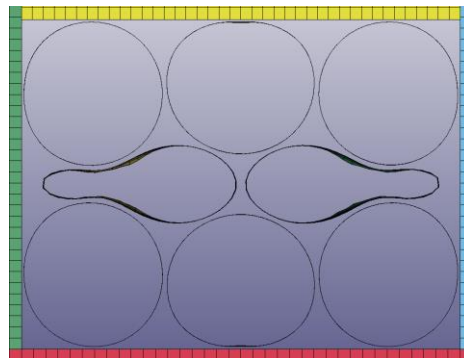
Iso όψη της προσομοίωσης:



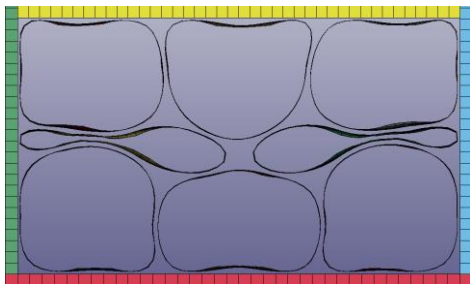
Θέση 1(0mm):



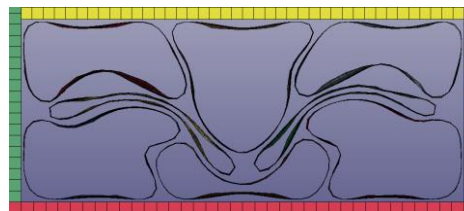
Θέση 2(15mm):



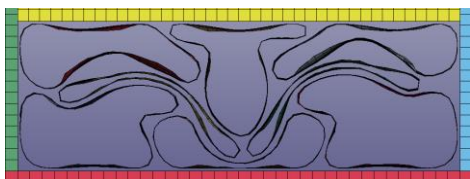
Θέση 3(30mm):



Θέση 4(45mm):



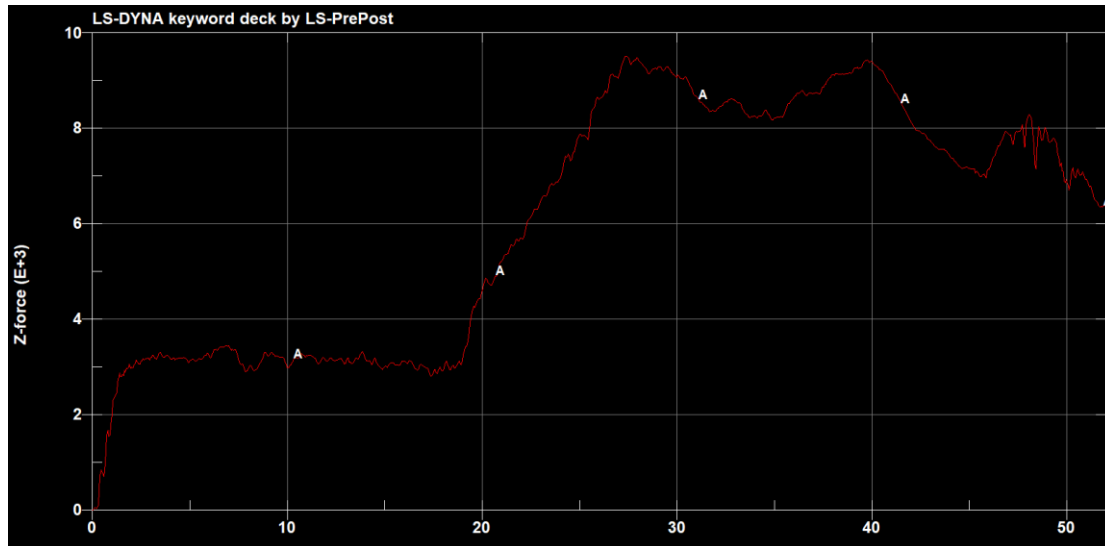
Θέση 5(52mm):



Πίνακας δεδομένων:

	$S_{max}(mm)$	$P_{mean}(kN)$	$P_{max}(kN)$	CFE	$E_{abs}(J)$
Μοντέλου	52	6,06	9,61	0,63	315,5

Διάγραμμα Φορτίου -Μετατόπισης:



Σχόλια επί της προσομοίωσης:

Τέλος χωρίς παρεμβλήματα και με μικρός πάχος έχουμε σχετικά χαμηλή ενέργεια απορρόφησης αλλά καλό CFE. Τα δοκίμια στη μεσαία σειρά ,με βάση τη παραμορφωση τους θα έπρεπε να έχουν θραυση η οποία όμως δεν απεικονίζεται στη προσομοίωση.

6.4. Παρατηρήσεις και σύγκριση των πειραματικών διατάξεων με τις διατάξεις μοντελοποίησης

6.4.1. Ορθογωνικές διατάξεις

Οι δύο μορφές διατάξεων, με και χωρίς παρεμβλήματα, παρουσιάζουν διαφορετικής μορφής καμπύλες. Συγκεκριμένα, οι διατάξεις χωρίς παρεμβλήματα έχουν μία ομαλή και με μικρότερη κλίση της καμπύλης μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή και τείνουν προοδευτικά αυξανόμενα μέχρι και το τέλος του πειράματος όπου και αποκτούν την μέγιστη τιμή του φορτίου επιβολής.

Αντίθετα, οι διατάξεις παρουσία των παρεμβλημάτων, εκκινούν απότομα, σχεδόν κατακόρυφα λαμβάνοντας έτσι την μέγιστη τιμή πολύ νωρίς στο πείραμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι πρώτες να παρουσιάζουν καλύτερο συντελεστή ομοιομορφίας (CFE) και να έχουν μεγαλύτερη περιοχή ομαλής απορρόφησης της ενέργειας με τις δεύτερες όμως, να παρουσιάζουν μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κρούσης, κυρίως λόγω αυτής της αρχικής μεγάλης αύξησης του φορτίου.

Συμφωνώντας με την θεωρία και τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί και οι τέσσερις διατάξεις μετά την αρχική μετάβαση στην πλαστική περιοχή, ακολουθούν με μικρές διακυμάνσεις την μέση τιμή P_{mean} του φορτίου.

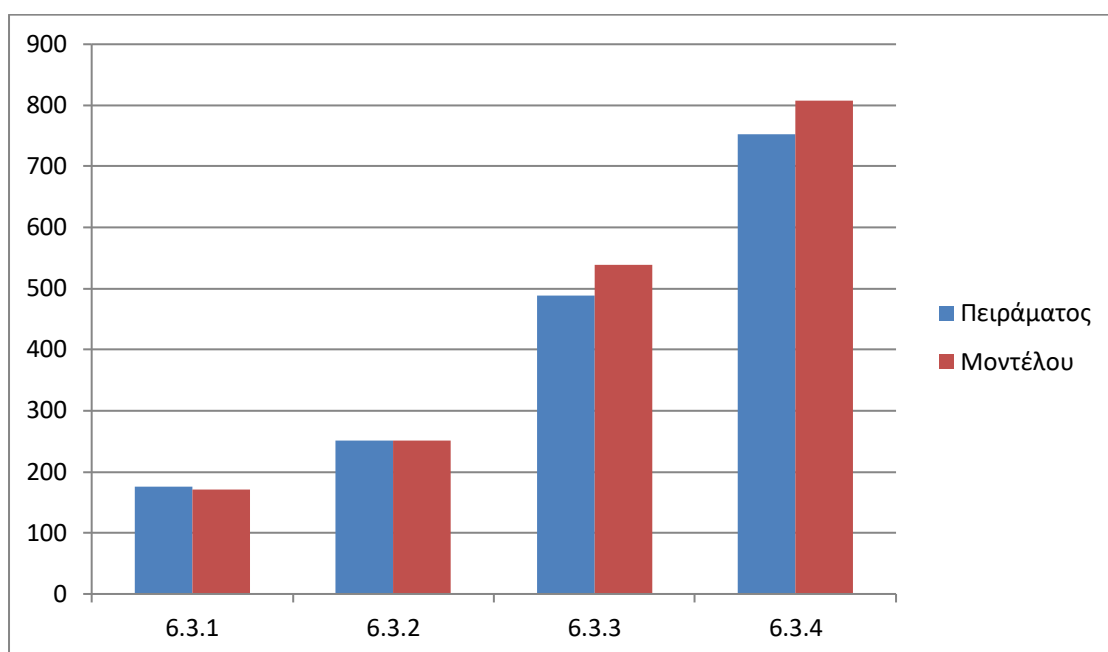
Οι μικρές κατακόρυφες πτώσεις που εμφανίζονται και σε αυτά, αλλά και σε επόμενα διαγράμματα είναι τα σημεία όπου η εφελκυστική τάση ξεπερνάει το όριο θραύσης του αλουμινίου.

Σε σύγκριση με τις αντίστοιχες προσομοιώσεις, παρατηρούμε ότι σε κάθε περίπτωση η εκάστοτε ενέργεια απορρόφησης βρίσκεται αρκετά κοντά στην πειραματική, εκτός από μία περίπτωση (το 6.3.3) στην οποία παρουσιάζεται θραύση σε δοκίμιο του πειράματος, η οποία όμως δεν προσομοιώνεται στο αντίστοιχο μοντέλο.

Αντίστοιχα κοντά βρίσκονται και τα υπόλοιπα δεδομένα, με εξαίρεση φυσικά τη τελευταία περίπτωση στην οποία αναφερθήκαμε πριν.

		$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\max}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
6.3.1.rect-10-wo	Πειράματος	30	5.88	7.55	0.77	176.4
	Μοντέλου	30	5.69	7.09	0.80	170.7
6.3.2.rect-10-wi	Πειράματος	30	8.35	20.24	0.41	250.5
	Μοντέλου	30	8.38	23.41	0.36	251.5
6.3.3.rect-15-wo	Πειράματος	30	16.28	24.45	0.66	488.4
	Μοντέλου	30	17.94	39.37	0.45	538.2
6.3.4.rect-15-wi	Πειράματος	30	25.08	56.62	0.44	752.4
	Μοντέλου	30	26.92	61.97	0.43	807.7

Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων



Συγκριτικό διάγραμμα ενεργειών απορρόφησης

6.4.2. Τριγωνικές διατάξεις

Οι τριγωνικές διατάξεις επιλέχθηκαν να δοκιμαστούν για δύο βασικούς λόγους. Ο πρώτος ήταν η αύξηση της διαδρομής του εμβόλου, άρα αμέσως έχουμε μεγαλύτερη διαδρομή για προστασία της κατασκευής. Ο δεύτερος λόγος ήταν ότι με αυτόν τον τρόπο δεν έχουμε πλευρικούς περιορισμούς, οι οποίοι δεν είναι πάντα δυνατόν να εφαρμοστούν στο σχεδιασμό μίας κατασκευής.

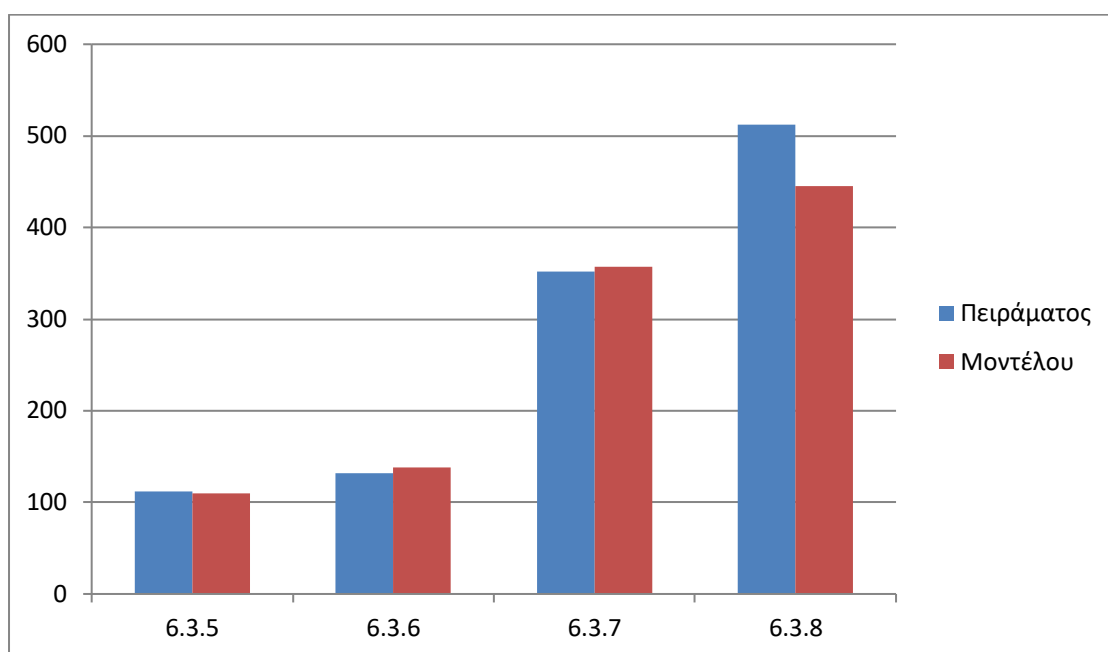
Αντίθετα με τις ορθογωνικές διατάξεις και οι τέσσερις τριγωνικές που δοκιμάστηκαν πειραματικά, παρουσίασαν την ίδια ακριβώς μορφή καμπύλης. Εκκινούσαν ομαλά και φτάνοντας την μέση τιμή P_{mean} του φορτίου παρέμεναν πολύ κοντά σε αυτή με μια απότομη αύξηση της κοντά στην περιοχή των 45mm διαδρομής του εμβόλου καταλήγοντας στην τελική και μέγιστη τιμή κάθε πειράματος. Μοναδική εξαίρεση η πειραματική διάταξη με πάχος δοκιμίου 1,5mm παρουσία παρεμβλημάτων, η οποία όμως οφείλεται σε θραύση του υλικού ενός εκ των δοκιμίων.

Η τελική αυτή απότομη αύξηση του φορτίου είναι και ο κύριος λόγος που οι τριγωνικές πειραματικές διατάξεις παρουσίασαν τους μικρότερους συντελεστές ομοιομορφίας από όλα τα πειράματα. Παρατηρήσαμε λοιπόν ότι η αύξηση της διαδρομής του εμβόλου από τα 30mm στα 52mm δεν είχε αποτέλεσμα όσον αφορά την αύξηση απορρόφησης ενέργειας.

Σε σύγκριση πάλι με τις αντίστοιχες προσομοιώσεις, η εικόνα είναι ίδια, με τις διαφορές να περιορίζονται με μια προσομοίωση να παρουσιάζει απόκλιση από την πειραματικά μετρούμενη ενέργεια απορρόφησης. Συγκεκριμένα στο 6.3.8 έχουμε διαφορά στην ενέργεια απορρόφησης που οφείλεται στο τρόπο κίνησης των παρεμβλημάτων στη προσομοίωση.

		$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\max}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
6.3.5.tri-10-wo	Πειράματος	52	2.15	7.93	0.27	111.8
	Μοντέλου	52	2.12	9.34	0.23	110.2
6.3.6.tri-10-wi	Πειράματος	52	2.54	12.88	0.19	132.08
	Μοντέλου	52	2.66	15.70	0.17	138.28
6.3.7.tri-15-wo	Πειράματος	52	6.76	28.08	0.24	351.52
	Μοντέλου	52	6.86	26.98	0.25	356.88
6.3.8.tri-15-wi	Πειράματος	52	9.85	66.656	0.15	512.2
	Μοντέλου	52	8.55	42.554	0.20	444.9

Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων



Συγκριτικό διάγραμμα ενεργειών απορρόφησης

6.4.3. Μικτές διατάξεις

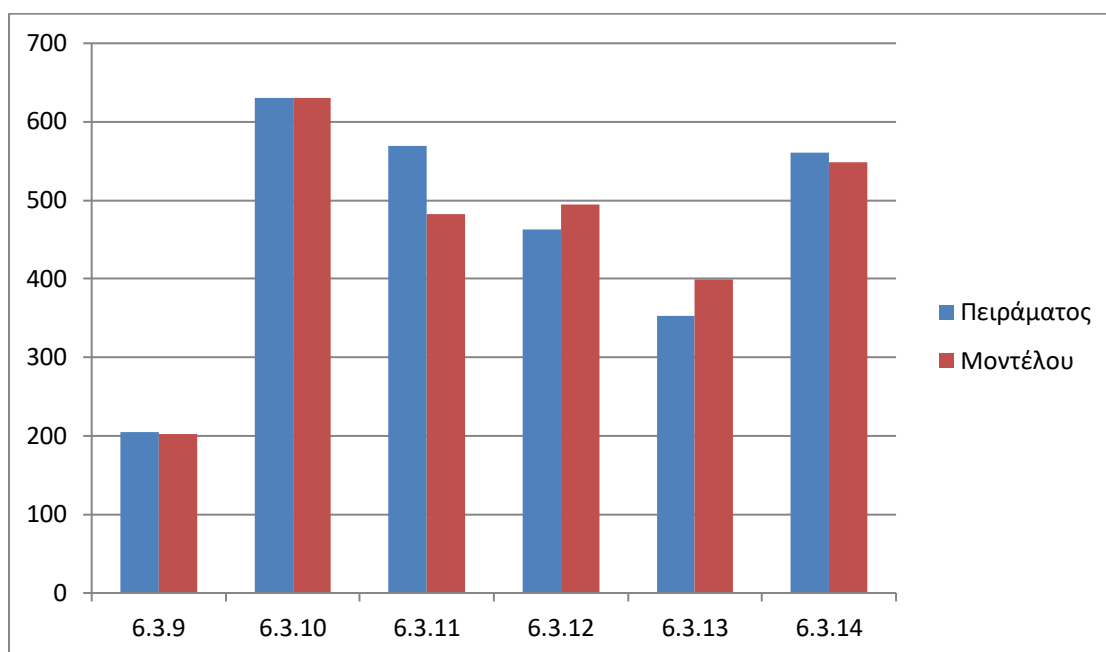
Όλα τα πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκε το σύνολο των απαραμόρφωτων παρεμβλημάτων, παρουσίασαν παρόμοιες μορφές καμπυλών ασχέτως των τιμών που έπαιρναν. Συγκεκριμένα, μέχρι τα πρώτα 4mm μετατόπισης του εμβόλου της πειραματικής διάταξης παρουσιαζόταν ένα αρχικό μέγιστο και στη συνέχεια, η τιμή του φορτίου έπεφτε και παρουσίαζε τιμές γύρω από την μέση τιμή φορτίου κάθε προφίλ.

Διαφορά παρουσιάστηκε στις δύο διατάξεις στις οποίες δεν τοποθετήθηκαν τα δύο κεντρικά παρεμβλήματα. Χωρίς να υπολείπονται στην αρχική αύξηση της τιμής, η μετέπειτα πτώση τους προς την περιοχή του plateau και την μέση τιμή, γίνεται πολύ πιο ομαλά καταφέροντας έτσι να διατηρήσουν υψηλό δείκτη ομοιομορφίας φορτίου (CFE), αλλά και στην περίπτωση των δοκιμίων με πάχος 1,5mm, καταφέρνουν να έχουν την υψηλότερη από αυτές τις διατάξεις ενέργεια απορρόφησης (E_{abs}).

Σε σύγκριση με τις προσομοιώσεις, διαφορές υπάρχουν όπου υπάρχει θραύση δοκιμίου και εφόσον αυτή δεν αποτυπώνεται στις αντίστοιχες προσομοιώσεις, έχουμε αποκλίσεις στα δεδομένα.

		$S_{max}(mm)$	$P_{mean}(kN)$	$P_{max}(kN)$	CFE	$E_{abs}(J)$
6.3.9.rect-10-woR1	Πειράματος	30	6.83	11.62	0.59	204.9
	Μοντέλου	30	6.75	12.05	0.56	202.5
6.3.10.rect-15-woR1	Πειράματος	30	21.0	27.31	0.77	630.9
	Μοντέλου	30	21.0	45.04	0.47	630.1
6.3.11.rect-15/10/15-wi	Πειράματος	30	18.99	33.65	0.54	569.7
	Μοντέλου	30	16.09	33.05	0.49	482.6
6.3.12.rect-10/15/10/15/10/15-wi	Πειράματος	30	15.44	23.06	0.67	463.2
	Μοντέλου	30	16.50	27.51	0.60	495.1
6.3.13.rect-10/15/10-wi	Πειράματος	30	11.76	21.82	0.54	352.8
	Μοντέλου	30	13.31	27.12	0.49	399.5
6.3.14.rect-10/15-wi	Πειράματος	30	18.68	28.82	0.65	560.4
	Μοντέλου	30	18.29	29.16	0.63	548.6

Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων



Συγκριτικό διάγραμμα ενεργειών απορρόφησης

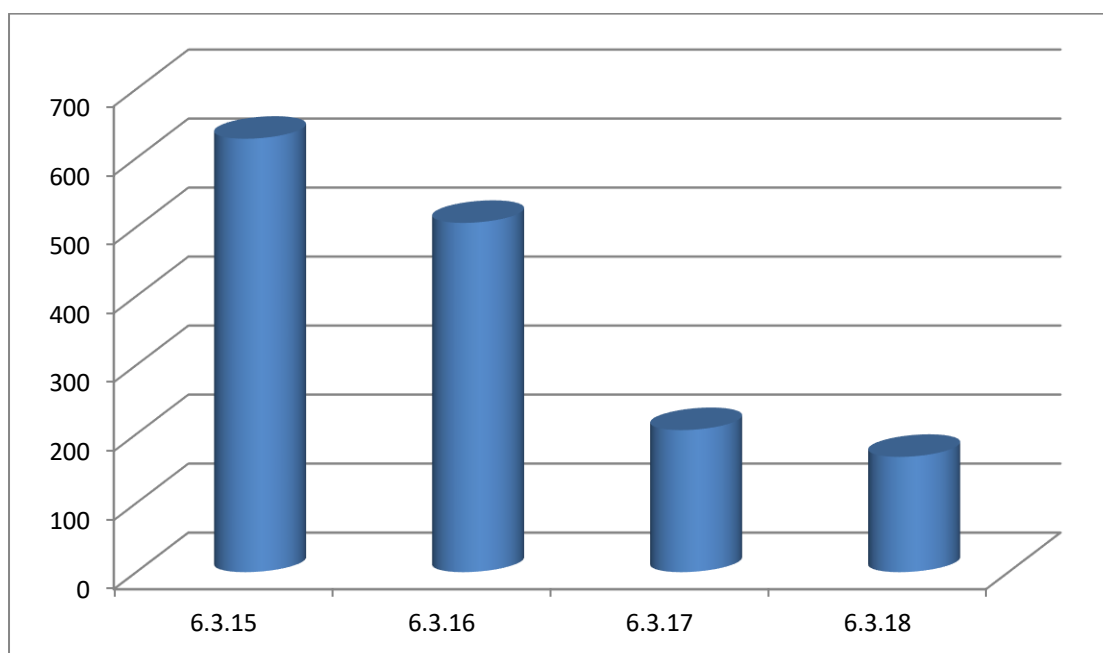
6.4.4. Παραμετρικές διατάξεις

Στη πρώτη εξαγωνική παραμετρική διάταξη, παρατηρούμε ότι σε όλες τις προσομοιώσεις το φορτίο διατηρείται σταθερό στο μεγαλύτερο μέρος και αυξάνεται στο τέλος, όταν πλέον έχουν καλυφθεί οι κενοί χώροι και στο πλάι.

Παρ' όλα αυτά η ενέργεια απορρόφησης παραμένει σχετικά χαμηλά και δεν είναι ικανοποιητική, σε σχέση και με τις προηγούμενες διατάξεις, ενώ ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου είναι και αυτός χαμηλός.

	$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\text{max}}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
6.3.15.par1-15-wi	52	12.08	36.72	0.33	628.17
6.3.16.par1-15-wo	52	9.73	25.35	0.38	506.2
6.3.17.par1-10-wi	52	3.95	14.73	0.27	205.9
6.3.18.par1-10-wo	52	3.21	9.29	0.35	167.1

Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων



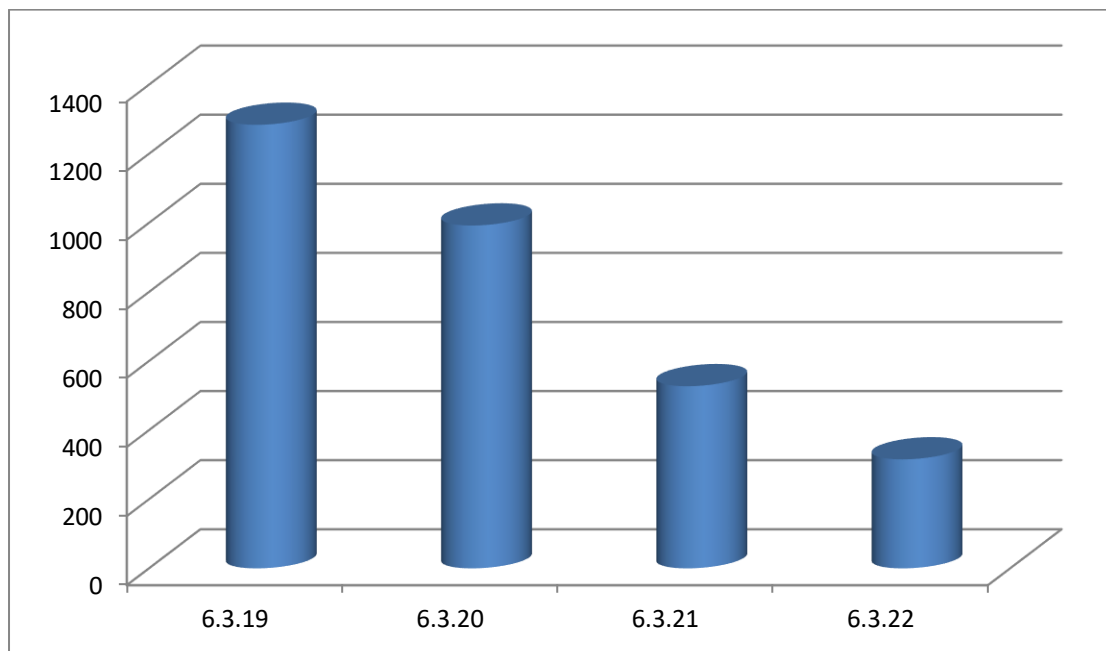
Συγκεντρωτικό διάγραμμα ενεργειών απορρόφησης

Στη δεύτερη διάταξη κλεψύδρας, το φορτίο αυξάνεται πιο νωρίς, από το μέσο της διαδρομής κιόλας, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη ενέργεια απορρόφησης και πιο ικανοποιητικά δεδομένα.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα καλύτερο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου και στη πρώτη διάταξη παρατηρείται και η μεγαλύτερη τιμή της ενέργειας απορρόφησης από όλες τις προσομοιώσεις.

	$S_{\max}(\text{mm})$	$P_{\text{mean}}(\text{kN})$	$P_{\max}(\text{kN})$	CFE	$E_{\text{abs}}(\text{J})$
6.3.19.par2-15-wi	52	26.49	47.42	0.52	1283.9
6.3.20.par2-15-wo	52	19.08	46.07	0.41	992.4
6.3.21.par2-10-wi	52	10.14	25.64	0.40	527.2
6.3.22.par2-10-wo	52	6.06	9.61	0.63	315.5

Συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων



Συγκεντρωτικό διάγραμμα ενεργειών απορρόφησης

6.5. Συμπεράσματα, περαιτέρω έρευνα και προτάσεις

Από τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων και τη σύγκριση με τα αντίστοιχα πειράματα προέκυψαν χρήσιμα δεδομένα, όπως και από την εκτέλεση των παραμετρικών διατάξεων.

6.5.1. Λόγοι απόκλισης δεδομένων μοντελοποίησης από αυτών του πειράματος

Σε κάποιες μοντελοποιήσεις υπήρχει απόκλιση των δεδομένων από τα αντίστοιχα πειραματικά, άλλοτε μικρή και άλλοτε μεγαλύτερη. Αυτό οφείλεται σε διάφορους λόγους.

Όσον αφορά το μοντέλο, αποκλίσεις μπορούν να προκληθούν από τους εξής λόγους:

- Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι εξιδανικευμένες (πχ γεωμετρία δοκιμίων, ονομαστικές διαστάσεις όπως πάχος τοιχώματος ή ομοιομορφία του πάχους, συνοριακές συνθήκες κτλ)
- Ομοιογένεια υλικού
- Διακριτοποίηση συνεχούς μέσου και μοντελοποίηση με shell elements τα οποία είναι δισδιάστατα

Μεταξύ του μοντέλου και του πειράματος υπάρχουν και άλλοι λόγοι για αυτές τις διαφορές:

- Ορθή και πλήρης αποτύπωση των ιδιοτήτων του υλικού (καμπύλη σ-ε). Για τη δημιουργία της καμπύλης που χρησιμοποιήθηκε στη διαδικασία της μοντελοποίησης δεν έγινε πρότυπη δοκιμή όσον αφορά στο σχήμα και στις διαστάσεις του δοκιμίου αλλά και στις συνθήκες συγκράτησης και φόρτισης του δοκιμίου, με αποτέλεσμα να είναι πολύ πιθανή η υποεκτίμηση των ιδιοτήτων του υλικού.
- Στο πείραμα σε αρκετές περιπτώσεις εμφανίστηκε θραύση των δοκιμίων. Στα αντίστοιχα μοντέλα δεν προσομοιώνεται η θραύση με αποτέλεσμα να επηρεάζεται το φορτίο και κατά συνέπεια και η τελική ενέργεια απορρόφησης.

6.5.2. Τελικά συμπεράσματα στη σύγκριση πειράματος-μοντελοποίησης

Παρατηρώντας συνολικά τα δεδομένα των πειραμάτων και συγκρίνοντας τα με τα αντίστοιχα των μοντέλων, βλέπουμε ότι στη πλειοψηφία των περιπτώσεων τα δεδομένα είναι αρκετά κοντά, αν όχι ίδια. Οι όποιες διαφορές υπάρχουν οφείλονται κατά κύριο λόγο στις αιτίες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Συμπεραίνουμε ότι η μοντελοποίηση μιας διάταξης μπορεί να μας δώσει μια καλή και σχετικά ακριβή εικόνα σχετικά με τα τελικά δεδομένα χωρίς την απαίτηση για τη διεξαγωγή του πειράματος, καθώς και να έχουμε μια ικανοποιητική εικόνα για τον τρόπο παραμόρφωσης των δοκιμίων, τουλάχιστον στις απλούστερες διατάξεις που εξετάστηκαν.

6.5.3. Περαιτέρω έρευνα και προτάσεις

Όσον αφορά τη περαιτέρω έρευνα σε νέα συστήματα απορρόφησης ενέργειας, προτείνεται επιπλέον πειραματική και περισσότερο μοντελιστική ανάλυση, εφόσον βέβαια προηγηθεί validation στον κώδικα που χρησιμοποιούμε με τα ήδη υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα.

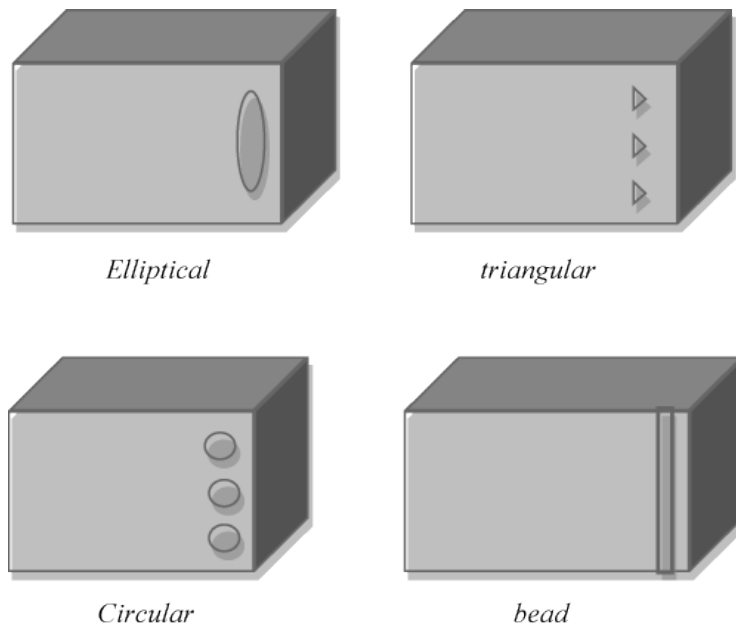
Η παραμετρική αυτή ανάλυση μπορεί να έχει ως μεταβλητές:

- Την γεωμετρία (σχήμα) των κελυφών
- Το πάχος του τοιχώματος
- Τη σχετική διάταξη (μεγάλη ποικιλία στο συνδυασμό των δοκιμίων)
- Τη γεωμετρία και θέση των παρεμβλημάτων
- Το υλικό των κελυφών

Επίσης μπορεί να γίνει πληρέστερος σχεδιασμός μίας διάταξης. Με βάση τα συσσωρευμένα αποτελέσματα από τις εναλλακτικές (παραμετρικές) διατάξεις, μπορούμε να επιχειρήσουμε να μελετήσουμε την καταλληλότερη που προέκυψε με στόχο τη βελτίωση των δεικτών αξιολόγησης της συμπεριφοράς που μας ενδιαφέρει.

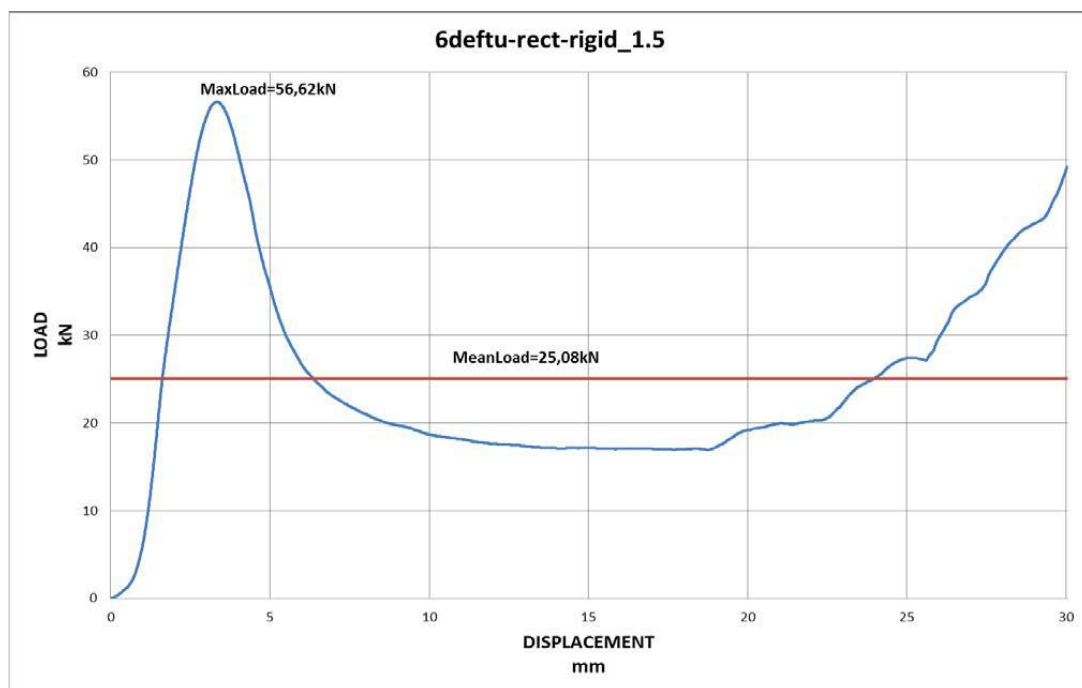
Για παράδειγμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν δοκιμιά στα οποία έχουν εφαρμοσθεί μηχανισμοί trigger. Αυτοί μας επιτρέπουν να κάνουμε ελεγχόμενη έναρξη της κατάρρευσης του δοκιμίου και να έχουμε προοδευτική της συνέχιση. Τέλος μπορούμε έτσι να μειώσουμε το μέγιστο φορτίο (P_{max}) βελτιώνοντας κατά συνέπεια τον δείκτη ομοιομορφίας φορτίου (CFE).

Στη διαδικασία αυτή γίνονται οπές σε κατάλληλα σημεία του δοκιμίου, έτσι ώστε να τροποποιηθεί κατάλληλα η συμπεριφορά του και το φορτίο που απαιτείται.



Εικόνα 6.1: Διάφορα είδη οπών στο μηχανισμό trigger [17]

Για παράδειγμα στο πείραμα 6.3.4 έχουμε το παρακάτω διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης:



Με τη καταλληλή επεξεργασία μπορούμε να μειώσουμε το αρχικό μεγάλο φορτίο με αποτέλεσμα να βελτιωθεί ο δείκτης ομοιομορφίας υλικού, ο οποίος στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι σχετικά χαμηλός στο 0,44.

Στα δοκίμια της εικόνας 6.1, σε δοκιμές που εκτελέστηκαν, τα δεδομένα έδειξαν έως και 5,3% μείωσης του αρχικού μέγιστου φορτίου, ενώ βλέπουμε και τη σχετική βελτίωση στον CFE. [17]

Παράμετροι τύπου trigger	E_{abs} (kJ)	P_{max} (kN)	CFE
Χωρίς trigger	24429	226	0,466
Σχισμή	21280	222	0,489
Ελλειπτικός	23753	214	0,491
Κυκλικός	23269	225	0,475
Τριγωνικός	24073	224	0,479

Συγκεντρωτικός πίνακας όλων των δεδομένων στη παρούσα εργασία:

		$S_{max}(mm)$	$P_{mean}(kN)$	$P_{max}(kN)$	CFE	$E_{abs}(J)$
6.3.1.rect-10-wo	Πειράματος	30	5.88	7.55	0.77	176.4
	Μοντέλου	30	5.69	7.09	0.80	170.7
6.3.2.rect-10-wi	Πειράματος	30	8.35	20.24	0.41	250.5
	Μοντέλου	30	8.38	23.41	0.36	251.5
6.3.3.rect-15-wo	Πειράματος	30	16.28	24.45	0.66	488.4
	Μοντέλου	30	17.94	39.37	0.45	538.2
6.3.4.rect-15-wi	Πειράματος	30	25.08	56.62	0.44	752.4
	Μοντέλου	30	26.92	61.97	0.43	807.7
6.3.5.tri-10-wo	Πειράματος	52	2.15	7.93	0.27	111.8
	Μοντέλου	52	2.12	9.34	0.23	110.2
6.3.6.tri-10-wi	Πειράματος	52	2.54	12.88	0.19	132.08
	Μοντέλου	52	2.66	15.70	0.17	138.28
6.3.7.tri-15-wo	Πειράματος	52	6.76	28.08	0.24	351.52
	Μοντέλου	52	6.86	26.98	0.25	356.88
6.3.8.tri-15-wi	Πειράματος	52	9.85	66.656	0.15	512.2
	Μοντέλου	52	8.55	42.554	0.20	444.9
6.3.9.rect-10-woR1	Πειράματος	30	6.83	11.62	0.59	204.9
	Μοντέλου	30	6.75	12.05	0.56	202.5
6.3.10.rect-15-woR1	Πειράματος	30	21.0	27.31	0.77	630.9
	Μοντέλου	30	21.0	45.04	0.47	630.1
6.3.11.rect-15/10/15-wi	Πειράματος	30	18.99	33.65	0.54	569.7
	Μοντέλου	30	16.09	33.05	0.49	482.6
6.3.12.rect-10/15/10/15/10/15-wi	Πειράματος	30	15.44	23.06	0.67	463.2
	Μοντέλου	30	16.50	27.51	0.60	495.1
6.3.13.rect-10/15/10-wi	Πειράματος	30	11.76	21.82	0.54	352.8
	Μοντέλου	30	13.31	27.12	0.49	399.5
6.3.14.rect-10/15-wi	Πειράματος	30	18.68	28.82	0.65	560.4
	Μοντέλου	30	18.29	29.16	0.63	548.6
6.3.15.par1-15-wi		52	12.08	36.72	0.33	628.17
6.3.16.par1-15-wo		52	9.73	25.35	0.38	506.2
6.3.17.par1-10-wi		52	3.95	14.73	0.27	205.9
6.3.18.par1-10-wo		52	3.21	9.29	0.35	167.1
6.3.19.par2-15-wi		52	26.49	47.42	0.52	1283.9
6.3.20.par2-15-wo		52	19.08	46.07	0.41	992.4
6.3.21.par2-10-wi		52	10.14	25.64	0.40	527.2
6.3.22.par2-10-wo		52	6.06	9.61	0.63	315.5

Βιβλιογραφία:

- [1] <http://web.iitd.ac.in/> (Mukherjee S, Chawla A. Human Tolerance and Crashworthiness. Delhi: IIT)
- [2] <https://en.wikipedia.org/wiki/>
- [3] Lu G, Yu T. Energy Absorption of Structures and Materials. Cambridge: Woodhead Publishing; 2003.
- [4] Alghamdi AAA. Collapsible impact energy absorbers: an overview. Thin-Walled Structures 2001;39:189–213.
- [5] <http://www.kathimerini.gr/> (22/8/2010).
- [6] Johnson W. The elements of crashworthiness: scope and actuality. Proc Instn Mech Engrs, Part D: J Automobile Engineering 1990;204:255–73.
- [7] Kwon YW, Bang HC. The finite element method using matlab. 2nd ed. New York: CRC Press; 2000.
- [8] <http://www.lstc.com/>
- [9] Olabi AG, Morris Edmund, Hashmi MSJ. Metallic tube type energy absorbers: A synopsis, Thin-Walled Structures 2007;45:706–26.
- [10] Miscow P, Al-Qureshi H. Mechanics of static and dynamic inversion processes. Int J Mech Sci 1997;39(2):147–61.
- [11] Huang X, Lu G, Yu T. On axial splitting and curling of circular metal tubes. Int J Mech Sci 2002;44(11):2369–91.
- [12] Al-Hassani STS, Johnson W, Lowe WT. Characteristics of inversion tubes under axial loading. J Mech Engng Sci 1972;14(6):370-81.
- [13] Baroutaji A, Gilchrist MD, Olabi AG. Quasi-static, impact and energy absorption of internally nested tubes subjected to lateral loading. Thin-Walled Structures 2016;98:337–50.

- [14] Thomas SG, Reid SR, and Johnson W. Large deformations of thin-walled circular tubes under transverse loading – I: An experimental survey of the bending of simply supported tubes under a central load. *Int J Mech Sci* 1976;18:325.
- [15] <http://www.fgg.uni-lj.si/>
- [16] <http://www.sciencedirect.com/>
- [17] <http://www.oatext.com/>
- [18] Ayad Arab Ghaidan, Specific Energy Absorbed Study Of Aluminum (2024-351T) Tubes Alloy Under Lateral Crush, *Tikrit Journal of Eng. Sciences/Vol.18/No.3/September2011*
- [19] A.G. Olabi_, Edmund Morris, M.S.J. Hashmi, Metallic tube type energy absorbers: A synopsis, *Thin-Walled Structures* 45 (2007) 706–726
- [20] F.Tarlochan , F.Samer, A.M.S.Hamouda, S.Ramesh, Karam Khalid, Design of thin wallstructures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces, *Thin-WalledStructures*71(2013)7–17
- [21] X. N. Παναγόπουλος, Βιομηχανικά Κράματα, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [22] Δ. Ε. Μανωλάκος, Σημειώσεις του μαθήματος: Κατεργασίες I, Αθήνα: Τυπογραφείο ΕΜΠ, 2010.
- [23] Johnson W, Walton A., An experimental investigation of the energy dissipation of a number of car bumpers under quasi-static lateral loads., *Int. Journal Impact Eng.*1983;1(3):301–8